

TUGAS AKHIR - TE 141599

**ANALISA KOORDINASI SISTEM PROTEKSI DENGAN
MEMPERHITUNGKAN ARC FLASH PADA PT. PUPUK KUJANG**

Teddy Anugrah Ramanel
NRP 0711134000001

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
Dr. Eng Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE141599

**ANALISA KOORDINASI SISTEM PROTEKSI DENGAN
MEMPERHITUNGKAN ARC FLASH PADA PT. PUPUK
KUJANG**

Teddy Anugrah Ramanel
NRP 0711134000001

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Margo Pujiانتara, MT.
Dr. Eng Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE141599

***PROTECTION SYSTEM COORDINATION ANALYSIS WITH
CONSIDERING ARC FLASH IN PT. PUPUK KUJANG***

Teddy Anugrah Ramanel
NRP 07111340000001

Advisor
Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
Dr. Eng Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul **Analisa Koordinasi Sistem Proteksi Dengan Memperhitungkan Arc Flash Pada PT. Pupuk Kujang**, adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Desember 2017



Teddy Anugrah Ramanel
Nrp. 07111340000001

**ANALISA KOORDINASI SISTEM PROTEKSI DENGAN
MEMPERHITUNGKAN *ARC FLASH* PADA
PT. PUPUK KUJANG**


TUGAS AKHIR


Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dosen Pembimbing I,

Menyetujui :

Dosen Pembimbing II,


Dr. Ir. Margo Pujiyantara, MT.
NIP. 196603181990101001


Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
NIP. 197309271998031004



Analisa Koordinasi Sistem Proteksi Dengan Memperhitungkan *Arc Flash* Pada PT. Pupuk Kujang

Nama : Teddy Anugrah Ramanel
Pembimbing 1 : Dr. Ir. Margo Pujiyantara, MT.
Pembimbing 2 : Dr. Eng Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.

ABSTRAK

PT. Pupuk Kujang merupakan pabrik penghasil pupuk yang terletak di Cikampek, Jawa Barat. PT. Pupuk Kujang mempunyai dua pabrik yaitu pabrik K-1A dan pabrik K-1B dengan total beban 14,8 MW. Sistem pengaman dalam suatu industri adalah hal yang penting dan perlu diperhatikan. Karena, saat terjadi gangguan akan mempengaruhi kontinuitas *supply* daya listrik. Permasalahan dalam kontinuitas daya dapat menghambat suatu produksi dalam pabrik yang akhirnya menyebabkan kerugian dan menurunkan kualitas produksi. Untuk menyempurnakan koordinasi proteksi diperlukan setting proteksi dengan memperhitungkan *arc-flash*. Karena besarnya *energy arc-flash* dapat membahayakan para pekerja didalam pabrik dan merusak peralatan disekitarnya.

Hal yang dilakukan dalam studi ini adalah mencari arus hubung singkat maksimum, arus hubung singkat minimum, arus *pickup*, dan *time dial* dengan menggunakan *standart* IEEE 242. Setelah menyelesaikan koordinasi proteksi didapatkan data FCT (*Fault Clearing Time*), *I_b*, *gap conductor*, X factor, dan juga *Working distance* untuk menghitung arus *arc-flash*. Besarnya arus busur api akan digunakan untuk menghitung level energi *arc-flash* pada bus utama sesuai standar IEEE 1584 - 2002.

Dari hasil analisa studi koordinasi proteksi pada sistem eksisting dan *resetting* terdapat penurunan besarnya insiden energi pada bus 00-SG-01, GI Kujang, dan MCC 8. Hal ini disebabkan karena FCT (*Fault Clearing Time*) pada sistem eksisting menjadi lebih kecil setelah dikoordinasi dengan benar. Untuk bus 62-MCC-2 insiden energi bertambah besar karena nilai FCT saat eksisting sebesar 0,16 sekon setelah di *resetting* menjadi 0,21 sekon.

Kata Kunci : Koordinasi Proteksi, *Arc flash*, Insiden Energi, standar IEEE 1584–2002, FCT , Ibf , *gap conductor*, dan X factor

PROTECTION SYSTEM COORDINATION ANALYSIS WITH CONSIDERING ARC FLASH IN PT. PUPUK KUJANG

Name of Student : Teddy Anugrah Ramanel
Advisor 1 : Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
Advisor 2 : Dr. Eng Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.

ABSTRACT

PT. Pupuk Kujang is a fertilizer factory located in Cikampek, West Java. PT. Pupuk Kujang has two factories, namely K-1A plant and K-1B plant with a total load of 14.8 MW. The security system in an industry is important and needs to be considered. Because, when the interference will affect the continuity of power supply. Problems in power continuity can inhibit a production within the plant that ultimately leads to losses and degrades the quality of production. To improve the coordination of protection required protection settings by taking into account arc-flash. Because of the enormous amount of energy arc-flash can harm the workers in the factory and damage the surrounding equipment.

The results of this study were to find the maximum short circuit, minimum short-circuit current, pickup current, and time dial using IEEE 242 standard. After completing the protection coordination, FCT (Fault Clearing Time), I_{bf}, gap conductor, X factor, and also Working distance to calculate the current of arc-flash. The magnitude of the arc current will be used to calculate arc-flash energy levels on the main bus according to IEEE 1584 - 2002 standards.

From the analysis of protection coordination studies on the system of exiting and resetting there is a decrease in the magnitude of energy incidents on bus 00-SG-01, GI Kujang, and MCC 8. This is because FCT (Fault Clearing Time) in the existing system becomes smaller after coordinated with correct. For bus 62-MCC-2 the incidence of energy increases because of the existing FCT value of 0.16 seconds after resetting to 0.21 seconds.

Keywords: Coordination Protection, Arc flash, Incident Energy, IEEE 1584-2002 standard, FCT, I_{bf}, gap conductor, and X factor

----- *Halaman ini sengaja dikosongkan* -----

KATA PENGANTAR

Segala puji kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya kepada penulis dalam usaha dan kerja sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul :

“Analisa Koordinasi Sistem Proteksi Dengan Memperhitungkan *Arc Flash* Pada PT. Pupuk Kujang”

Tugas Akhir ini disusun guna memenuhi persyaratan untuk menyelesaikan studi di Bidang Studi Teknik Sitem Tenaga, Program Studi S1 Teknik Elektro, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Dalam penyusunan laporan Tugas Akhir ini, penulis banyak mendapatkan bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis dengan tulus ikhlas menyampaikan banyak terima kasih kepada :

1. Allah SWT yang telah memberikan anugerah kesehatan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini hingga selesai.
2. Orang tua penulis yang selalu memberikan masukan, do'a, semangat, kasih sayang, dan kepercayaan yang diberikan selama ini, serta dukungan baik moril maupun materil.
3. Bapak Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT. dan Bapak Dr. Eng Ardyono Priyadi, ST., M.Eng. selaku dosen pembimbing, atas segala ilmu, masukan dan kesediaannya meluangkan waktu untuk membimbing serta memberi dukungan sehingga laporan ini dapat terselesaikan tepat waktu.
4. Dosen-dosen Teknik Elektro yang telah memberikan ilmu dan pengalamannya sehingga penulis bisa mengerjakan Tugas Akhir ini.
5. Gian, Vania, dan Khanza selaku adik-adik penulis yang selalu mengingatkan dan memberikan support kepada penulis untuk segera menyelesaikan Tugas Akhir ini.
6. Syamsul, Fadly, Putra, Lutfi, Ryanda, Faridz, Randa, Fuad, Zuhdi selaku keluarga baru penulis di Surabaya yang selalu mengingatkan, memberikan masukan dan menyemangati penulis dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.

7. Widya Fathiyah yang selalu memberikan dukungan dan semangat bagi penulis baik secara langsung maupun tidak dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.
8. Ibu Evie yang selama 3 tahun ini mempercayakan rumahnya untuk penulis tempati bersama teman-teman "kontrakan tercinta".
9. Teman-teman LIPIST atas masukan dan diskusinya selama ini yang telah banyak membantu penulis untuk menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini.
10. Teman-teman kos Update 1, Fadly, Ridho, Fachri, Ihsan. Terima kasih telah menemani penulis begadang selama pengerjaan Tugas Akhir ini di kos.
11. Teman-teman Elektro 2013 yang telah memberi masukan untuk menunjang Tugas Akhir ini.
12. Dan semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang telah memberikan doa, dorongan dan bantuan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini baik secara langsung maupun tidak langsung.

Kesalahan tak terpisahkan dari manusia. Karena itu, saya sebagai penulis meminta maaf apabila dalam pembuatan maupun penyusunan Tugas Akhir ini banyak terdapat kekurangan. Dengan segala kerendahan hati, semoga dengan terselesaikannya Tugas Akhir ini, dapat bermanfaat bagi kita semua sebagai pengembangan ilmu pengetahuan umumnya dimasa mendatang.

Surabaya, Desember 2017

Penulis

DAFTAR ISI

JUDUL	
PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
BAB I. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Metodologi	3
1.6 Sistematika Penulisan	4
1.7 Relevansi	4
BAB II. KOORDINASI PROTEKSI SISTEM KELISTRIKAN DAN ARC FLASH	
2.1 Koordinasi Proteksi	5
2.1.1 Gangguan Sistem Tenaga Listrik	5
2.1.2 Penyebab Gangguan Arus Lebih pada Sistem Tenaga Listrik	6
2.1.2.1 Gangguan Beban Lebih	6
2.1.2.2 Gangguan Hubung Singkat	6
2.1.3 Perhitungan Arus Hubung Singkat	7
2.1.4 Rele Arus Lebih	9
2.1.4.1 Rele Arus Lebih Waktu <i>Inverse</i>	9
2.1.4.2 Rele Arus Lebih Waktu Tertentu	10
2.1.4.3 Rele Arus Lebih Waktu Instan	11
2.1.5 Pengaturan Rele Arus Lebih	12
2.1.5.1 Pengaturan Rele Arus lebih Waktu <i>Inverse</i> .	12
2.1.5.2 Pengaturan Rele Arus lebih Waktu Instan ...	13
2.1.5.3 Pengaturan Rele Berdasarkan Arus dan Waktu	14
2.1.6 Rele Gangguan ke Tanah	14
2.2 <i>Arc Flash</i>	15

2.2.1 Perhitungan Busur Api Listrik Menggunakan Standar IEEE 1584-2002	16
2.2.2 Perhitungan <i>Flash Protection Boundary</i> dengan Menggunakan Standar IEEE 1584-2002	17
2.2.3 Pengelompokan Besar Energi Sesuai Standar NFPA 70E-2004	18

BAB III. SISTEM KELISTRIKAN PT. PUPUK KUJANG

3.1 Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kujang	23
3.2 Data Kelistrikan PT.Pupuk Kujang	24
3.2.1 Sistem Pembangkitan PT.Pupuk Kujang	24
3.2.2 Data Transformator pada PT.Pupuk Kujang.....	25
3.2.3 Data Kabel pada PT. Pupuk Kujang	26
3.2.4 Data Motor pada PT. Pupuk Kujang.....	28
3.2.5 Sistem Pengaman Arus Lebih.....	29

BAB IV. HASIL SIMULASI DAN ANALISA KOORDINASI PROTEKSI MEMPERHITUNGKAN ARC *FLASH* PADA PT. PUPUK KUJANG

4.1 Pemodelan Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kujang	31
4.2 Pemilihan Tipikal Koordinasi Proteksi Sistem Kelistrikan pada PT. Pupuk Kujang	32
4.3 Analisis Arus Gangguan Hubung Singkat	32
4.3.1 Analisis Hubung Singkat Minimum	33
4.3.2 Analisis Hubung Singkat Maksimum.....	33
4.4 Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Fasa	34
4.4.1 Koordinasi Rele Arus Lebih Tipikal 1	34
4.4.1.1 <i>Pick-up</i> Rele Eksisting Tipikal 1	36
4.4.1.2 Analisis Perhitungan Resetting Tipikal 1	44
4.4.1.3 Analisis Perhitungan Resetting Memperhitungkan <i>Arc Flash</i> Tipikal 1	53
4.4.2 Koordinasi Rele Arus Lebih Tipikal 2	61
4.4.2.1 <i>Pick-up</i> Rele Eksisting Tipikal 2	62
4.4.2.2 Analisis Perhitungan Resetting Tipikal 2	67
4.4.2.3 Analisis Perhitungan Resetting Memperhitungkan <i>Arc Flash</i> Tipikal 2	72
4.5 Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan ke Tanah Tipikal 1	77
4.6 Perhitungan Insiden Energi Busur Api dengan Standar IEEE 1584-2002 pada Sistem Eksisting	82

4.7 Hasil Simulasi Insiden Energi Busur Api dengan Standar IEEE 1584-2002 pada Sistem <i>Resetting</i>	84
4.8 Perhitungan Insiden Energi Busur Api dengan Standar IEEE 1584-2002 pada Sistem <i>Resetting</i>	85
4.9 Perbandingan Hasil Simulasi Insiden Energi Busur Api <i>Resetting</i> dengan Perhitungan Insiden Energi Busur Api <i>Resetting</i> dengan Standar IEEE 1584-2002	88
4.10 Hasil Simulasi Insiden Energi Busur Api dengan Standar IEEE 1584-2002 pada Sistem Resetting Memperhitungkan <i>Arc Flash</i>	89
4.11 Perhitungan Insiden Energi Busur Api dengan Standar IEEE 1584-2002 pada Sistem Resetting Memperhitungkan <i>Arc Flash</i>	90
4.12 Perbandingan Hasil Simulasi Insiden Energi Busur Api Resetting Memperhitungkan <i>Arc Flash</i> dengan Perhitungan Insiden Energi Busur Api Memperhitungkan <i>Arc Flash</i> Menurut Standar IEEE 1584-2002.....	93
4.13 Perhitungan <i>Flash Protection Boundary</i> Kondisi <i>Resetting</i> Memperhitungkan <i>Arc Flash</i>	94
4.14 Perbandingan Besar Energi Busur Api Kondisi Eksisting, <i>Resetting</i> , dan <i>Resetting</i> Memperhitungkan <i>arc flash</i>	96
4.15 <i>Personal Protective Equipment (PPE)</i> yang Harus Digunakan pada PT. Pupuk Kujang	98

BAB V. PENUTUP

5.1 Kesimpulan	101
5.2 Saran	102

DAFTAR PUSTAKA	103
BIODATA PENULIS	

----- *Halaman ini sengaja dikosongkan* -----

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Karakteristik Standar <i>Inverse</i> , <i>Very Inverse</i> dan <i>Extremely Inverse</i>	10
Gambar 2.2	Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Tertentu	10
Gambar 2.3	Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Tertentu	11
Gambar 2.4	Kombinasi IDMT dengan Rele Arus Lebih Waktu Instan	11
Gambar 2.5	Rele Arus Lebih Pengaman Trafo.....	14
Gambar 2.6	Pengelompokan Alat Perlindungan Diri Berdasarkan Kategori	21
Gambar 3.1	<i>Single Line Diagram</i> PT. Pupuk Kujang	23
Gambar 4.1	<i>Single Line Diagram</i> Tipikal PT. Pupuk Kujang.....	32
Gambar 4.2	<i>Single Line Diagram</i> Tipikal 1	35
Gambar 4.3	Hasil <i>Plot Eksisting</i> Rele Gangguan Fasa Tipikal 1 ..	43
Gambar 4.4	Hasil <i>Plot Resetting</i> Rele Gangguan Fasa Tipikal 1 ..	52
Gambar 4.5	Hasil <i>Plot Resetting</i> Rele Gangguan Fasa Tipikal 1 Memperhitungkan <i>Arc Flash</i>	60
Gambar 4.6	<i>Single Line Diagram</i> Tipikal 2	61
Gambar 4.7	Hasil <i>Plot Eksisting</i> Rele Gangguan Fasa Tipikal 2	66
Gambar 4.8	Hasil <i>Plot Resetting</i> Rele Gangguan Fasa Tipikal 2..	71
Gambar 4.9	Hasil <i>Plot Resetting</i> Rele Gangguan Fasa Tipikal 2 Memperhitungkan <i>Arc Flash</i>	76
Gambar 4.10	<i>Single Line Diagram</i> Tipikal 1 Gangguan Fasa ke Tanah	78
Gambar 4.11	Hasil <i>Plot Eksisting</i> Rele Gangguan Fasa ke Tanah Tipikal 1.....	79
Gambar 4.12	Hasil <i>Plot Resetting</i> Rele Gangguan Fasa ke Tanah Tipikal 1.....	81

----- *Halaman ini sengaja dikosongkan* -----

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Tabel Rangkaian dan Persamaan Gangguan Hubung Singkat.....	8
Tabel 2.2	Tabel Koefisien Kurva Inverse.....	13
Tabel 2.3	Kategori <i>Insident Energy</i>	19
Tabel 2.4	<i>PPE (Personal Protective Equipment)</i>	20
Tabel 3.1	Data Total Pembangkitan Pembebanan, dan Kebutuhan Daya	24
Tabel 3.2	Data Spesifikasi Generator.....	24
Tabel 3.3	Data Spesifikasi Transformator.....	25
Tabel 3.4	Data Spesifikasi Kabel	26
Tabel 3.5	Data Spesifikasi Motor.....	28
Tabel 4.1	Data Arus Hubung Singkat Minimum pada Bus Utama	33
Tabel 4.2	Data Arus Hubung Singkat Maksimum pada Bus Utama	34
Tabel 4.3	Data Setting Rele 1 Eksisting	36
Tabel 4.4	Data Setting Rele 2 Eksisting	37
Tabel 4.5	Data Setting Rele 3 Eksisting	38
Tabel 4.6	Data Setting Rele 4 Eksisting	39
Tabel 4.7	Data Setting Rele 5 Eksisting	41
Tabel 4.8	Data Setting Rele 11 Eksisting	42
Tabel 4.9	Data Setting Rele 1 Resetting.....	44
Tabel 4.10	Data Setting Rele 2 Resetting.....	45
Tabel 4.11	Data Setting Rele 3 Resetting.....	46
Tabel 4.12	Data Setting Rele 4 Resetting.....	48
Tabel 4.13	Data Setting Rele 5 Resetting.....	49
Tabel 4.14	Data Setting Rele 11 Resetting.....	50
Tabel 4.15	Data Setting Rele 1 Resetting Memperhitungkan Arc Flash	53
Tabel 4.16	Data Setting Rele 2 Resetting Memperhitungkan Arc Flash	54
Tabel 4.17	Data Setting Rele 3 Resetting Memperhitungkan Arc Flash	55
Tabel 4.18	Data Setting Rele 4 Resetting Memperhitungkan Arc Flash	56
Tabel 4.19	Data Setting Rele 5 Resetting Memperhitungkan Arc Flash	58

Tabel 4.20 Data Setting Rele 11 Resetting Memperhitungkan Arc Flash.....	59
Tabel 4.21 Data Setting Rele 16 Eksisting.....	62
Tabel 4.22 Data Setting Rele 17 Eksisting.....	63
Tabel 4.23 Data Setting Rele 21 Eksisting.....	64
Tabel 4.24 Data Setting Rele 16 Resetting	67
Tabel 4.25 Data Setting Rele 17 Resetting	68
Tabel 4.26 Data Setting Rele 21 Resetting	69
Tabel 4.27 Data Setting Rele 16 Resetting Memperhitungkan Arc Flash.....	72
Tabel 4.28 Data Setting Rele 17 Eksisting Memperhitungkan Arc Flash.....	74
Tabel 4.29 Data Setting Rele 21 Eksisting Memperhitungkan Arc Flash.....	70
Tabel 4.30 Tabel Tegangan dan Pentanahan Peralatan Transformator	77
Tabel 4.31 Data Setting Rele 1 Gangguan ke Tanah	80
Tabel 4.32 Data Setting Rele 2 Gangguan ke Tanah	80
Tabel 4.33 Data Bus Untuk Perhitungan Energi Busur Api Eksisting	82
Tabel 4.34 Data Hasil Simulasi Perhitungan Energi Busur Api Kondisi Resetting.....	85
Tabel 4.35 Data Bus Untuk Perhitungan Energi Busur Api Kondisi Resetting	86
Tabel 4.36 Perbandingan Insiden Energi Perhitungan dan Simulasi Kondisi Resetting.....	89
Tabel 4.37 Data Hasil Simulasi Perhitungan Energi Busur Api Kondisi Resetting Memperhitungkan Arc Flash.....	90
Tabel 4.38 Data Bus Untuk Perhitungan Energi Busur Api Kondisi Resetting Memperhitungkan Arc Flash.....	91
Tabel 4.39 Perbandingan Insiden Energi Perhitungan dan Simulasi Kondisi Resetting Memperhitungkan Arc Flash.....	94
Tabel 4.40 Hasil <i>Flash Protection Boundary</i> Resetting Memperhitungkan Arc Flash	96
Tabel 4.40 Data Hasil Simulasi Perhitungan Energi Busur Api Kondisi Resetting Memperhitungkan Arc Flash.....	90
Tabel 4.41 Data Perbandingan Insiden Energi Sistem Eksisting, Resetting, dan Resetting Memperhitungkan Arc Flash.	97
Tabel 4.42 Kategori PPE Bus Utama pada PT. Pupuk Kujang	98

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Menurut data *National Fire Protection Association (NFPA)* 70E-2004, *arc flash* adalah kondisi yang berbahaya akibat adanya pelepasan energy yang disebabkan oleh bunga api listrik. Karena *arc flash* sangat berbahaya untuk keselamatan pekerja, maka perlu analisa koordinasi proteksi yang baik untuk meminimalisir dampak bahaya yang ditimbulkan sesuai dengan standar yang diizinkan. Analisa koordinasi proteksi juga dapat mengetahui kategori bahaya insiden energy *arc flash* yang terjadi.

Busur api (*arc flash*) disebabkan karena adanya gangguan arus atau *arching fault* pada sebuah sistem kelistrikan. Gangguan ini berupa kegagalan isolasi, kegagalan mekanik, korosi atau *human error*. Efek yang ditimbulkan akibat terjadinya busur api *arc flash* berupa ledakan, panas, tekanan yang besar bahkan kebakaran. Efek ini dapat merusak peralatan dan kecelakaan yang fatal pada pekerja.

Selanjutnya, PT. Pupuk Kujang merupakan pabrik penghasil pupuk yang terletak di Cikampek, Jawa Barat. PT. Pupuk Kujang mempunyai dua pabrik yaitu pabrik K-1A dan pabrik K-1B dengan total beban 14,8 MW. Untuk menjaga kontinuitas daya listrik di perlukan koordinasi sistem proteksi untuk meminimalisir apabila terjadi gangguan. Ketika terjadi gangguan, diharapkan pemutus atau *circuit breaker* (CB) terdekat dapat bekerja secepatnya. Apabila CB tersebut gagal bekerja maka diharapkan CB terdekat setelah itu dapat berkerja sebagai *back-up*. Salah satu gangguan yang terjadi adalah munculnya busur api (*arc flash*). Oleh karena itu, untuk menjaga keamanan dan keselamatan pekerja dari bahaya *arc flash* perlu diketahui daya yang di hasilkan oleh gangguan tersebut agar tidak melebihi standar yang diizinkan karena dapat membahayakan pekerja.

Pada tugas akhir ini dilakukan koordinasi proteksi dan *setting rele* untuk mengurangi besar bahaya *arc flash* yang terjadi pada PT. Pupuk Kujang. Hasil ini juga dapat digunakan oleh pekerja untuk menjaga keamanan dan keselamatan dalam menggunakan pakaian yang sesuai standar saat bekerja di daerah yang rawan bahaya *arc flash*.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang dibahas dalam tugas akhir ini:

1. Bagaimakah sistem koordinasi proteksi dengan memperhitungkan *arc flash* pada PT. Pupuk Kujang?
2. Bagaimanakah kategori insiden energi dan batasan jarak pekerja terhadap bahaya *arc flash* pada sistem kelistrikan PT. Pupuk Kujang?
3. Alat pelindung apa yang digunakan pekerja sesuai standar NFPA 70E yang pada PT. Pupuk Kujang?

1.3 Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini diharapkan sebagai berikut:

1. Melakukan analisis koordinasi proteksi kelistrikan pada PT. Pupuk Kujang agar bahaya *arc flash* yang di hasilkan sesuai standar.
2. Pekerja dapat mengetahui daerah kategori bahaya insiden energi *arc flash* yang terjadi pada PT. Pupuk Kujang.
3. Pekerja dapat menggunakan peralatan yang sesuai saat berada di daerah insiden energi tersebut.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah pada analisis koordinasi proteksi dengan memperhitungkan *arc flash* pada PT. Pupuk Kujang. Batasan ini dirinci kepada analisis koordinasi proteksi kelistrikan, mengetahui kategori bahaya insiden energi *arc flash*, dan penggunaan peralatan yang sesuai saat berada di daerah insiden. Masalah ini hanya dikerjakan pada bagian medium voltage/jaringan interkoneksi.

1.5 Metodologi

Metode yang digunakan dalam tugas akhir ini terdiri dari studi literature, pengumpulan data, pemodelan sistem, simulasi, analisis hasil data, kesimpulan, dan penyusunan laporan.

1. Studi Literature

Mengumpulkan data–data mengenai sistem kelistrikan PT. Pupuk Kujang seperti *single line diagram*, rating kabel, transformator, generator, motor, *bus*, rele dan sistem pentanahan akan digunakan dalam pemodelan sistem pada simulasi. Data rating yang dibutuhkan berupa manufaktur, kV rating, pf rating, *Full Load Ampere (FLA)*, impedansi, daya dan hubungan belitan pada transformator, motor dan generator. Kemudian mengumpulkan buku serta referensi yang berhubungan dengan koordinasi proteksi, dan analisa perhitungan busur api serta jarak aman pekerja disetiap level energi *arc flash*.

2. Pengumpulan Data

Data yang diperlukan untuk melakukan kordinasi proteksi dan perhitungan energi *arc flash* adalah data-data tegangan menengah pada *electrical room*. Data-data ini dapat diperoleh dari PT. Pupuk Kujang meliputi data-data spesifikasi peralatan ,Saluran, Circuit Breaker (CB), Relay, dan beban.

3. Pemodelan Sistem

Pada pemodelan sistem tugas akhir ini, data sistem kelistrikan PT Pupuk Kujang yang diperlukan harus sudah lengkap.

4. Simulasi

Simulasi untuk tugas akhir ini menggunakan bantuan *software* ETAP 12.6. Data–data yang dibutuhkan, digunakan untuk memperbaiki kordinasi proteksi sistem *eksisting*. Jika perlu *resetting*, maka sistem dapat diresetting agar keandalan suatu pabrik dapat meningkat.

5. Analisis Hasil Data, dan Penyusunan Laporan

Dengan melakukan analisis hasil data kemudian dapat ditentukan kordinasi proteksi yang baru. Setelah itu menghitung *Personal Protection Equipment (PPE)* yang harus digunakan. Sebagai dasar bahaya busur api yang digunakan mengacu dari *National Fire Protection Association (NFPA) 70E-2009*.

Setelah analisa selesai langkah akhir dari penyusunan tugas akhir ini adalah pemberian saran dan rekomendasi untuk penelitian selanjutnya.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang dilakukan pada tugas akhir ini dibagi dalam lima bab dengan deskripsi sebagai berikut:

Bab I: Pendahuluan

Pada bab ini akan dibahas tentang latar belakang, permasalahan, tujuan, batasan masalah, metodologi, sistematika penulisan serta relevansi pada tugas akhir ini.

Bab II: Dasar Teori

Pada bab ini akan dibahas tentang teori-teori penunjang tentang koordinasi proteksi pada sistem tenaga listrik dan juga standar-standar yang digunakan untuk mengkategorikan bahaya - bahaya *arc flash*.

Bab III: Sistem kelistrikan PT. Pupuk Kujang

Pada bab ini akan dibahas terkait data-data kondisi kelistrikan yang ada pada PT. Pupuk Kujang baik data pembangkitan maupun data pembebanan.

Bab IV: Simulasi dan Analisis

Pada bab ini berisi perhitungan dan hasil simulasi yang telah dilakukan. Perhitungan dan pengaturan parameter-parameter yang terdapat pada rele pengaman dilakukan dengan mengikuti acuan dan standar yang sudah ada serta perhitungan dan pengaturan bahaya arc flash seminimalnya dan sesuai standar.

Bab V: Kesimpulan

Pada bab ini akan dibahas kesimpulan dari keseluruhan studi kasus pada tugas akhir ini dan juga beberapa saran terkait studi kasus yang telah dianalisis.

1.7 Relevansi

1. Hasil ini dapat menjadi referensi dan rekomendasi untuk PT. Pupuk Kujang dalam permasalahan *arc flash* yang terjadi pada PT tersebut.
2. Hasil ini dapat menjadi pedoman bagi pekerja terhadap daerah yang rawan terjadi *arc flash* pada PT. Pupuk Kujang

BAB 2

KOORDINASI PROTEKSI SISTEM KELISTRIKAN DAN ARC FLASH

2.1 Koordinasi Proteksi

Koordinasi proteksi pada sistem kelistrikan bertujuan untuk mengamankan peralatan dan sistem kelistrikan secara menyeluruh. Ketika terjadi gangguan pada sistem kelistrikan, rele proteksi harus bekerja mengisolir gangguan dan segera mengoperasikan pemutus daya (*Circuit Breaker*) agar kerusakan pada peralatan dapat ditanggulangi dan *supply* tenaga listrik dapat terjaga dengan baik [1].

Koordinasi proteksi pada setiap sistem harus didesain supaya koordinasi pada setiap rele bekerja dengan baik dan tertib sesuai dengan letak terjadinya gangguan. Zona rele pada koordinasi proteksi dibagi menjadi zona *primer* dan zona *back up*. Rele pada zona *primer* merupakan rele terdekat dengan titik terjadinya gangguan dan bekerja sesegera mungkin saat terjadinya gangguan, sedangkan rele *back up* adalah rele yang bekerja saat rele *primer* tidak bekerja untuk mengisolasi gangguan. Rele *back up* bekerja setelah beberapa waktu setelah rele *primer* tidak bekerja atau disebut juga *time delay*.

Untuk menjaga kontinuitas daya listrik di perlukan koordinasi sistem proteksi untuk meminimalisir apabila terjadi gangguan. Salah satu gangguan tersebut adalah munculnya busur api (*arc flash*). Menurut *National Fire Protection Association (NFPA) 70E-2004*, *arc flash* adalah kondisi yang berbahaya akibat adanya pelepasan energy yang disebabkan oleh bunga api listrik [2].

2.1.1 Gangguan Sistem Tenaga Listrik

Gangguan pada sistem tenaga listrik adalah kejadian yang menyebabkan kondisi pada sistem tenaga listrik menjadi abnormal. Gangguan mengakibatkan mengalirnya arus yang tidak seimbang dalam sistem tiga fasa. Secara umum klasifikasi gangguan pada sistem tenaga listrik disebabkan oleh [3] : Gangguan yang berasal dari sistem dan gangguan dari luar sistem.

Bila ditinjau dari segi lamanya waktu gangguan, dapat dikelompokkan menjadi [3] :

1. Gangguan temporer (sementara) : Jenis gangguan temporer adalah gangguan yang dapat hilang dengan sendirinya atau akan hilang ketika bagian yang mengalami gangguan diputus secara sesaat dari sistem kelistrikan melalui *circuit breaker* yang terbuka oleh rele pengaman. Dalam jenis gangguan ini, peralatan yang mengalami gangguan dapat dioperasikan kembali. Gangguan jenis ini dapat menjadi gangguan permanen jika gangguan yang tidak diatasi atau diisolir secara seketika.
2. Gangguan permanen : Jenis gangguan permanen adalah gangguan yang terjadi ketika terdapat kerusakan bersifat permanen pada peralatan, sehingga gangguan ini hanya dapat dihilangkan ketika peralatan yang mengalami gangguan dilepas dari sistem untuk diperbaiki atau diganti sehingga dapat dioperasikan kembali.

2.1.2 Penyebab Gangguan Arus Lebih pada Sistem Tenaga Listrik

Gangguan arus lebih pada sistem tenaga listrik merupakan gangguan yang sering terjadi. Gangguan arus lebih dapat disebabkan oleh dua hal, yaitu beban lebih (*overload*) dan hubung singkat (*Short Circuit*).

2.1.2.1 Gangguan Beban Lebih

Gangguan beban lebih adalah gangguan yang terjadi ketika arus yang mengalir kedalam suatu peralatan melebihi batas arus nominal yang diizinkan ($I > I_n$). Gangguan ini dapat terjadi ketika terdapat kegagalan isolasi pada peralatan, atau pengoperasian peralatan melebihi *rating* peralatan. Peralatan yang mengalami gangguan beban lebih harus segera diamankan karena arus yang melebihi kapasitas dapat merusak peralatan listrik.

2.1.2.2 Gangguan Hubung Singkat

Gangguan hubung singkat adalah gangguan yang terjadi ketika terjadinya hubungan dari fasa atau tanah (*ground*) yang seharusnya tidak terhubung. Akibatnya, kontinuitas daya akan terhenti karena membukanya *circuit breaker*, tetapi hal tersebut lebih baik karena jika arus hubung singkat tidak segera dihilangkan akan merusak peralatan.

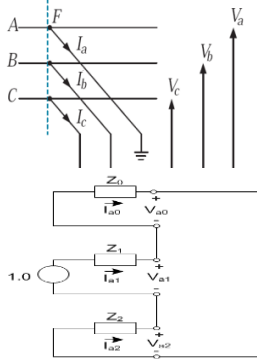
Gangguan hubung singkat dapat diklasifikasikan menjadi gangguan hubung singkat simetri dan gangguan hubung singkat asimetri. Gangguan hubung singkat simetri adalah gangguan hubung singkat tiga

fasa yang meliputi gangguan hubung singkat antar tiga fasa (L-L-L) dan hubung singkat tiga fasa ke tanah (L-L-L-G). Sedangkan gangguan hubung singkat asimetri meliputi gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah (L-G), gangguan hubung singkat antar fasa (L-L) dan gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah (L-L-G).

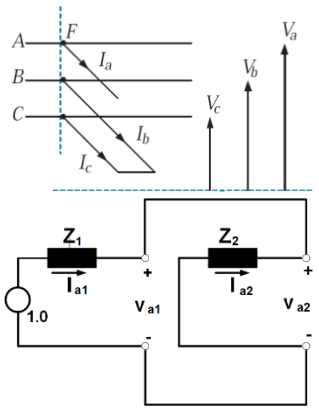
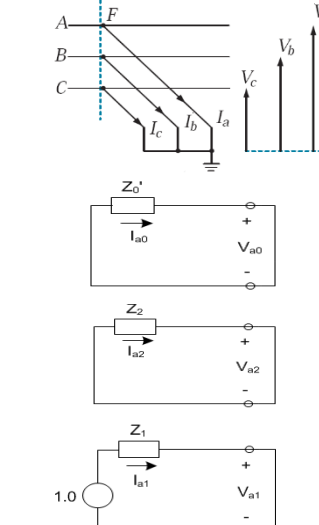
2.1.3 Perhitungan Arus Hubung Singkat

Berikut adalah cara perhitungan praktis untuk menentukan besar arus hubung singkat menurut referensi[4]:

Tabel 2.1 Tabel rangkaian dan persamaan gangguan hubung singkat

Gangguan Hubung singkat	Rangkaian Hubung Singkat & Rangkaian Pengganti	Persamaan
1 fasa ke tanah		$I_b = 0$ $I_c = 0$ $V_a = 0$ $I_{sc} = \frac{3V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_3}$

Tabel 2.1 Tabel rangkaian dan persamaan gangguan hubung singkat (lanjutan)

Gangguan Hubung singkat	Rangkaian Hubung Singkat & Rangkaian Pengganti	Persamaan
Antar fasa		$I_a = 0$ $I_b = -I_c$ $V_b = V_c$ $I_{sc} = \left \pm j \frac{\sqrt{3}V_f}{Z_1 + Z_2} \right $
3 fasa langsung (simetri)		$V_{a2} = 0$ $I_{a0} = 0$ $I_{a2} = 0$ $a0 = 0$ $I_{sc} = \frac{V_f}{Z_1}$

2.1.4 Rele Arus lebih (*Overcurrent Relay*)

Rele pengamanan yang banyak digunakan dalam sistem tenaga listrik adalah rele arus lebih karena mampu mengamankan gangguan beban lebih (*overload*) dan gangguan hubung singkat (*short circuit*) pada sistem kelistrikan. Rele arus lebih akan beroperasi ketika arus yang mengalir pada sistem melebihi batas yang diizinkan dengan cara memberikan sinyal kepada pemutus untuk bekerja, berikut adalah kondisi kerja rele[5]:

$I_f > I_p$	rele bekerja	(<i>trip</i>)
$I_f < I_p$	tidak bekerja	(blok)

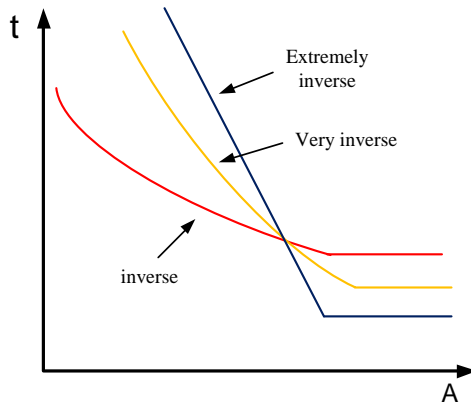
Nilai I_p adalah arus kerja atau arus *pick up* yang dinyatakan menurut gulungan sekunder dari trafo arus (CT) yang terhubung ke rele. Sedangkan I_f merupakan arus gangguan yang mengalir pada sisi primer CT.

Berdasarkan standar IEEE 242 mengenai koordinasi proteksi *overcurrent relay*, rele analog pada umumnya akan bekerja dengan waktu 0.3-0.4 detik. Sedangkan untuk rele digital berbasis mikroprosesor akan bekerja saat 0.2-0.3 detik. Tujuan adanya standar waktu kerja rele adalah untuk memastikan zona *backup* akan bekerja apabila zona primer gagal bekerja. Tujuan lain adalah untuk menghindari terjadinya *trip* secara serentak. Dalam penggunaannya, rele arus lebih terbagi menjadi rele arus lebih waktu *inverse*, rele arus lebih waktu tertentu, dan rele arus lebih waktu instan.

2.1.4.1 Rele Arus Lebih Waktu *Inverse*

Waktu operasi rele arus lebih waktu *inverse* berbanding terbalik dengan besarnya arus gangguan. Sehingga semakin besar arus gangguan yang terjadi maka rele akan semakin cepat bekerja, begitu pula sebaliknya[6]. Prinsip kerja tersebut dapat dijelaskan melalui kurva TCC (*Time Current Characteristic*) dengan menggunakan skala *time dial*.

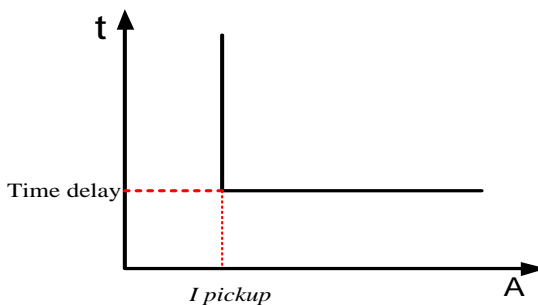
Pada beberapa standar seperti standar IEC 60225 dan IEEE 242 menjelaskan bahwa jenis perlindungan waktu invers dibedakan menggunakan gradien kurva yang berbeda-beda. Kurva-kurva tersebut adalah *extemely inverse*, *very inverse*, dan *standard inverse*. Karakteristik kurva rele arus lebih waktu *inverse* dapat dilihat pada gambar 2.1



Gambar 2.1 Karakteristik *standard inverse*, *very inverse* dan *extremely inverse*

2.1.4.2 Rele Arus Lebih Waktu Tertentu

Rele arus lebih waktu tertentu dapat diatur berdasarkan *level* arus yang mengalir. Maka dari itu gangguan terdekat akan langsung diputus sesuai dengan *time delay setting* yang telah ditentukan. *Level* arus yang melebihi *pick-up set point* akan diputus dalam waktu bersamaan (*definite*).

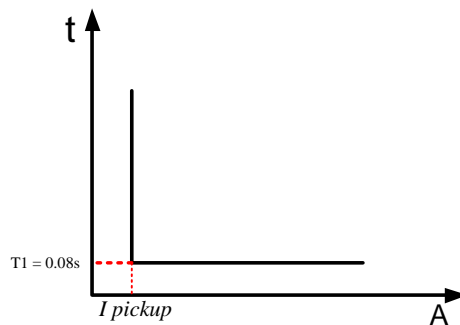


Gambar 2.2 Karakteristik rele arus lebih waktu tertentu

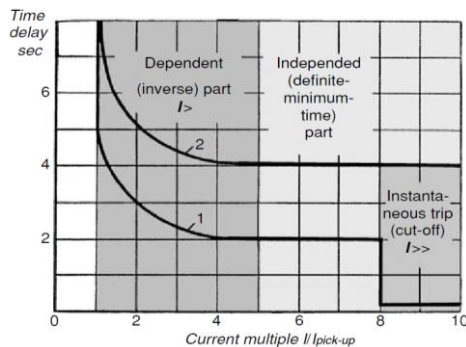
2.1.4.3 Rele Arus Lebih Waktu Instan

Rele arus lebih waktu instan adalah jenis rele yang bekerja tanpa adanya penundaan waktu ketika arus yang mengalir melebihi nilai yang telah ditentukan. Waktu tercepat kerja rele tersebut adalah 0.1 detik, namun pada umumnya dapat bekerja kurang dari 0.08detik. Karakteristik kurva rele arus lebih waktu instan dapat dilihat pada gambar 2.3

Ketika arus yang melewati CT melebihi besar arus *pick up*, rele akan memberi sinyal kepada CB untuk memutus daya dalam waktu sangat cepat (80 ms). Penggunaan IDMT yang dikombinasikan dengan rele arus lebih waktu instan ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.3 Karakteristik rele arus lebih waktu *instant*



Gambar 2.4 Kombinasi IDMT dengan rele arus lebih waktu instan [7]

2.1.5 Pengaturan Rele Arus Lebih

Sebelum melakukan pengaturan rele arus lebih, dibutuhkan studi aliran daya terlebih dahulu. Hal ini dikarenakan studi aliran daya merupakan dasar dalam melakukan perencanaan, pengoperasian, penjadwalan yang ekonomis, serta perpindahan daya antar peralatan dalam sistem kelistrikan[7]. Setelah itu dilakukan studi hubung singkat untuk memperoleh besaran nilai arus hubung singkat maksimum dan nilai arus hubung singkat minimum.

2.1.5.1 Pengaturan Rele Arus Lebih Waktu *Inverse*

Pada rele arus lebih, rele tidak boleh bekerja pada saat beban maksimum. Sehingga pengaturan arus harus lebih besar dari arus beban maksimum. Pemilihan *tap* ditentukan oleh besarnya nilai arus *pickup* dengan menggunakan persamaan berikut[1]:

$$Tap = \frac{I_{set}}{CT_{primary}} \quad (2.4)$$

Dimana:

I_{set} = arus *pickup* dalam satuan Ampere.

Dalam penyetapan rele arus lebih waktu inverse, untuk menentukan waktu operasi rele dibutuhkan nilai untuk parameter *overcurrent* dan *setting time dial*. Berdasarkan *British Standard* BS-142, penentuan *overcurrent* ditentukan dengan persamaan berikut:

$$1,05 \times FLA < I_{set} < 1,4 \times FLA \quad (2.5)$$

Dimana:

FLA = arus beban penuh pada peralatan

Sedangkan nilai *time dial* dari setiap kurva karakteristik invers rele arus lebih didapatkan dari persamaan berikut[7]:

$$t_d(I) = \frac{k}{\left(\frac{I}{I_s}\right)^\alpha - 1} \times \frac{T}{\beta} \quad (2.6)$$

Dimana:

t_d = waktu operasi (detik)

T = time dial

I = nilai arus (Ampere)

I_{set} = arus pickup (Ampere)

$k, \alpha,$ dan β = koefisien invers (lihat Tabel 2.2)

Tabel 2.2 Tabel koefisien rele kurva *inverse*

Tipe Kurva	Nilai Koefisien		
	k	α	β
Standard Inverse	0,14	0,02	2,97
Very Inverse	13,5	1	1,5
Long Time Inverse	120	1	13,33
Extremely Inverse	80	2	0,808
Ultra Inverse	315,2	2,5	1

2.1.5.2 Pengaturan Rele Arus Lebih Waktu Instan

Studi hubung singkat diperlukan untuk mendapatkan nilai arus dan tegangan maksimum serta minimum pada titik tertentu dari sistem kelistrikan untuk mengetahui jenis gangguan yang terjadi. Setelah itu nilai tersebut akan digunakan dalam penyetelan rele arus lebih waktu instan[8]. Selain itu nilai dari studi arus hubung singkat tersebut akan digunakan untuk penyetelan nilai *pickup set point*. Sehingga nilai *pickup set point* didapatkan dari persamaan berikut:

$$1,6 \times FLA \leq I_{set} \leq 0,8 \times I_{sc \min} \quad (2.7)$$

Dimana:

FLA = arus beban penuh pada peralatan

$I_{sc \min}$ = nilai arus hubung singkat minimum

Dari persamaan tersebut, nilai 0,8 merupakan faktor keamanan dari sistem proteksi apabila terjadi gangguan dengan arus hubung singkat lebih kecil dari arus hubung singkat minimum.

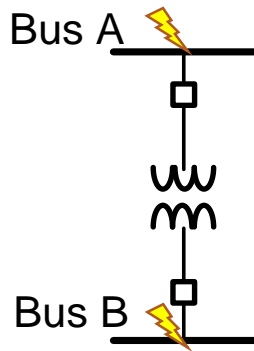
Apabila terdapat kondisi khusus dalam suatu *feeder* seperti gambar 2.4 yaitu terdapat dua daerah: daerah tegangan rendah (LV) dan daerah tegangan tinggi (HV) yang dipisahkan oleh sebuah transformator, maka penyetelan *pickup set point* adalah sebagai berikut:

$$I_{sc \max \text{ bus B}} \leq I_{set} \leq 0,8 I_{sc \min \text{ bus A}} \quad (2.8)$$

Dimana:

$I_{sc \max \text{ bus B}}$ = nilai arus hubung singkat maksimum pada titik B

$I_{sc \min \text{ bus A}}$ = nilai arus hubung singkat minimum pada titik A



Gambar 2.5 Rele Arus Lebih Pengaman Trafo

2.1.5.3 Pengaturan Rele Berdasarkan Arus dan Waktu

Sistem koordinasi proteksi pada sistem kelistrikan dikatakan baik apabila pengaman yang bekerja berjalan sesuai urutan dengan waktu tertentu. Sehingga tidak terjadi tumpang tindih antara rele primer dengan rele *backup*. Rele primer harus bekerja terlebih dahulu sebelum rele *backup* bekerja.

Maka dari itu dibutuhkan adanya *time delay* atau sering disebut juga dengan *grading time*. Berdasarkan standar IEEE 242-2001 didapatkan nilai *time delay* sebagai berikut:

Waktu buka *Circuit Breaker* : 0,06 – 0,1 detik (3-5 cycle)

Overtravel rele : 0,1 detik

Faktor keamanan : 0,12 – 0,22 detik

Apabila menggunakan rele digital berbasis *microprocessor*, maka nilai dari *overtravel* rele dapat diabaikan[5].

2.1.6 Rele Gangguan ke Tanah (*Ground Fault Relay*)

Rele gangguan ke tanah bekerja untuk mengamankan gangguan satu fasa ke tanah dan dua fasa ke tanah yang dilengkapi dengan *zero sequence current filter*. Rele tersebut akan membatasi arus gangguan ke tanah dengan menggunakan impedansi rendah. Pertimbangan-pertimbangan seperti adanya arus urutan nol yang akan terisolasi pada transformator belitan delta atau arus urutan nol yang akan mengalir dari

sumber gangguan transformator belitan wye perlu diperhitungkan. Maka dari itu rele gangguan ke tanah dapat disetting menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$10\% I_{SC\ L-G} \leq I_{set} \leq 50\% I_{SC\ L-G} \quad (2.9)$$

Dimana:

$I_{SC\ L-G}$ = nilai arus hubung singkat satu fasa ke tanah

2.2 Arc Flash

Dalam medesain sistem proteksi, harus melihat beberapa akibat saat terjadi gangguan di suatu sistem. Salah satunya yaitu bahaya *arch flash* (busur api). *Arch flash* atau *arch blast* (busur api) merupakan peristiwa yang terjadi karena adanya aliran arus yang mengalir diudara antara konduktor dari fasa ke fasa, fasa ke *ground*, atau dari beda fasa ke *ground*. Adanya busur api akan menimbulkan radiasi panas disekitarnya hingga mencapai *temperature* 35,000 °F . Terjadinya busur api ini, juga diikuti oleh kilatan cahaya yang dapat mengganggu penglihatan dan bahkan juga dapat merusak mata seseorang. Selain itu, busur api juga dapat menghasilkan ledakan yang sangat keras serta dapat menyebabkan luka bakar bagi pekerja yang terpapar di daerah kejadian.

Penyebab utama terjadinya *arch flash* adalah karena kesalahan manusia dalam bekerja dan juga kegagalan sistem listrik. Salah satu kesalahan para pekerja yang sering terjadi adalah menaruh peralatan listrik (ex : obeng, tang, dll) pada konduktor yang sedang teraliri listrik. Selain itu lingkungan untuk perlengkapan peralatan listrik haruslah dijaga kebersihannya dari debu, korosi, binatang, dll. Untuk mengurangi besarnya energi dari *arch flash*, menurut standart NFPA 70E ada beberapa cara dalam hal itu yaitu mengurangi arus *short circuit*, mengatur ukuran trafo, memperbesar impedansi trafo, dan juga memperbesar resistansi *ground* pada sistem tegangan rendah. Besarnya energi busur api juga tergantung pada seberapa cepat sistem pengamanan bekerja saat ada gangguan hubung singkat. Semakin cepat *circuit breaker* bekerja semakin kecil pula busur api yang dihasilkan. Dalam menyempurnakan koordinasi sistem proteksi, perlu memperhatikan bahaya dari adanya *arc flash* atau busur api yang mungkin bisa terjadi. Secara sederhana, busur api sendiri dapat didefinisikan sebagai kondisi berbahaya yang berhubungan dengan pelepasan energi disebabkan oleh adanya busur listrik .

Terdapat beberapa faktor yang dapat mempengaruhi besarnya energi *arc flash* yaitu besarnya level tegangan, seberapa jauh jarak antar konduktor, dan juga seberapa cepat waktu rele dalam menghilangkan gangguan tersebut. Pada setiap *switchgear* harus diketahui berapa besarnya energi busur api yang terjadi, hal ini bertujuan untuk memberikan peringatan kepada para pekerja maupun orang yang disekitar area bahaya.

2.2.1 Perhitungan Busur Api Listrik Menggunakan Standar IEEE 1584-2002. [8]

Pada perhitungan dengan standar IEEE 1584-2002 yang harus pertama kali diketahui adalah nilai dari *arcing fault*. Nilai *arcing fault* dapat digunakan perhitungan selanjutnya.

Untuk perhitungan *arcing fault* pada level tegangan dibawah 1000 Volt dapat diselesaikan dengan persamaan :

$$\lg I_a = K + 0.662 \lg I_{bf} + 0.0966 V + 0.000526 G + 0.5588 V \quad (2.10)$$

$$(\lg I_{bf}) - 0.00304 G (\lg I_{bf})$$

Untuk perhitungan *arcing fault* pada level tegangan diatas 1000 Volt dapat diselesaikan dengan persamaan :

$$\lg I_a = 0.00402 + 0.983 \lg I_{bf} \quad (2.11)$$

Lalu nilai I_a dapat diperoleh :

$$I_a = 10^{\lg I_a} \quad (2.13)$$

Dimana :

$\lg = \log_{10}$

$\lg I_a$ = arus arcing (kA)

$K = -0.153$ untuk konfigurasi terbuka dan

-0.097 untuk konfigurasi box

$\lg I_b$ = bolted fault current pada gangguan tiga fase
(symmetrical RMS) (kA)

$V =$ tegangan sistem (kV)

$G =$ jarak antar konduktor (mm)

Setelah I_a (arcing current) didapatkan, selanjutnya untuk menghitung *incident energy* yang dipakai kembali adalah nilai dari $\lg I_a$.

Setelah nilai *arcing current* diketahui maka nilai dari *incident energy* dapat dihitung. Untuk mendapatkan besar energy yang normal, waktu *arcing* yang digunakan adalah 0.2 detik dan jarak dari titik *arcing* ke manusia sebesar 610 mm. Persamaan yang digunakan adalah :

$$\lg E_n = K1 + K2 + 1.081 \lg I_a + 0.0011 G \quad (2.14)$$

Dimana :

E_n = *incident energy* (J/cm²) *normalized* untuk waktu dan jarak

K1 = -0.792 untuk konfigurasi terbuka (*no enclosure*)

-0.555 untuk konfigurasi *box* (*enclosed equipment*)

K2 = 0 untuk sistem *ungrounded* and *high-resistance grounded*

-0.113 untuk sistem *grounded*

G = jarak antar konduktor (mm)

Setelah itu besar energi E_n dapat diketahui :

$$E_n = 10^{\lg E_n} \quad (2.15)$$

Setelah nilai E_n didapatkan, untuk menghitung besar energi E digunakan persamaan :

$$E = 4.184 C_f E_n \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right) \quad (2.16)$$

Dimana :

E = *incident energy* (J/cm²)

C_f = faktor pengali

1.0 untuk tegangan diatas 1kV, dan

1.5 untuk tegangan dibawah 1kV

E_n = *incident energy normalized*

t = waktu *arcing* (detik)

D = jarak dari kemungkinan titik *arcing* ke orang (mm)

x = jarak exponent

2.2.2 Perhitungan *Flash Protection Boundary* dengan Menggunakan Standar IEEE 1584-2002. [8]

Flash protection boundary adalah batas jarak dari peralatan tanpa isolasi dengan pekerja secara langsung yang dapat mengakibatkan luka bakar tingkat 2.

Perhitungan *flash protection boundary* dilakukan dengan persamaan :

$$D_B = \left[4.184 C_f E_n \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \quad (2.17)$$

Dimana :

D_B = jarak batas dari titik *arcing* (mm)

C_f = factor pengali

1.0 untuk tegangan diatas 1kV, dan

1.5 untuk tegangandibawah 1kV

E_n = *incident energy normalized*

E_B = *incident energy in 5 J/cm2 at the boundary distance*

t = waktu *arcing* (detik)

x = jarak exponent

Untuk metode Lee, *flash protection boundary* dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$D_B = \sqrt{2,142 \times 10^6 V I_{bf} \left(\frac{t}{E_B} \right)} \quad (2.18)$$

Dimana :

D_B = jarak batas dari titik *arcing* (mm)

V = level tegangan (kV)

I_{bf} = *bolted fault current*

E_B = *incident energy in 5 J/cm2 at the boundary distance*

t = waktu *arcing* (detik)

2.2.3 Pengelompokan Besar Energi Sesuai Standar NFPA 70E – 2004 [9]

PPE (Personel Protective Equipment) merupakan pakaian atau peralatan yang didesain untuk mengendalikan risiko terhadap kesehatan dan keselamatan di tempat kerja [10]. Ini termasuk:

- Perlindungan mata (kaca mata pengaman)
- Perlindungan pendengaran (sumbat telinga, penutup telinga)

- Perlindungan pernapasan (alat pernapasan, masker muka, penyaring isian)
- Perlindungan kaki (bot pengaman)
- Perlindungan kepala (topi keras, helm, topi matahari)
- Perlindungan tubuh (pakaian yang mudah dilihat, pakaian hangat, pakaian kerja, apron, celemek, harness pengaman)
- Bahan yang digunakan untuk melindungi kesehatan (krim matahari)
- Pakaian luar (rombi reflektif, jaket fluoro).

Untuk mengetahui perlindungan apa saja yang harus dibutuhkan, maka dibutuhkan standar yang digunakan untuk pengelompokannya. Dengan menggunakan standar NFPA 70E diharapkan meminimalisir kecelakaan kerja ketika pekerja bekerja di dekat peralatan kelistrikan dan juga konduktor [9].

Berikut adalah tabel dari NFPA 70E *Table 130.7(C)(11)*, yang disajikan dalam Tabel 2.3 :

Tabel 2.3 Kategori *Incident Energy*[4]

<i>Incident Energy (cal/cm²)</i>		<i>Hazard Risk Category</i>	<i>Required Minimum Arc Rating of PPE (cal/cm²)</i>	<i>Class Color</i>
<i>From</i>	<i>To</i>			
0	1.2	0	N/A	
1.2	4.0	1	4	
4.0	8.0	2	8	
8.0	25.0	3	25	
25.0	40.0	4	40	

Tabel 2.4 PPE (Personal Protection Equipment) [9]

Kategori Resiko Bahaya	Nilai Insiden Energi (E) maksimal (Cal/cm ²)	Perlengkapan Perlindungan
0	2	• Pelindung Mata
		• Pelindung Telinga
		• Kemeja Lengan Panjang
		• Celana Panjang
		• Pelindung Mata
1	4	• Pelindung Mata
		• Pelindung Telinga
		• Kemeja Lengan Panjang
		• Celana Panjang
2	8	• Flash Suit Hood
		• Pelindung Wajah dan Kepala
		• Pakaian Tahan Api
		• Pelindung Mata
		• Pelindung Telinga
3	25	• Flash Suit Hood
		• Pelindung Wajah dan Kepala
		• Pakaian Tahan Api
		• Pelindung Mata
		• Pelindung Telinga
		• Celana Panjang
4	40	• Up to 40 cal/cm ² Flash Suit Hood
		• Pelindung Wajah dan Kepala
		• Pakaian Tahan Api
		• Pelindung Mata
		• Pelindung Telinga
		• Celana Panjang

Dengan menggunakan PPE seperti pada Tabel 2.4 diatas diharapkan dampak dari kecelakaan akibat *arc flash* berkurang.

Adapun tampilan visual pengelompokan alat perlindungan diri berdasarkan kategori seperti Gambar 2.5



Gambar 2.6 Pengelompokan alat perlindungan diri berdasarkan kategori

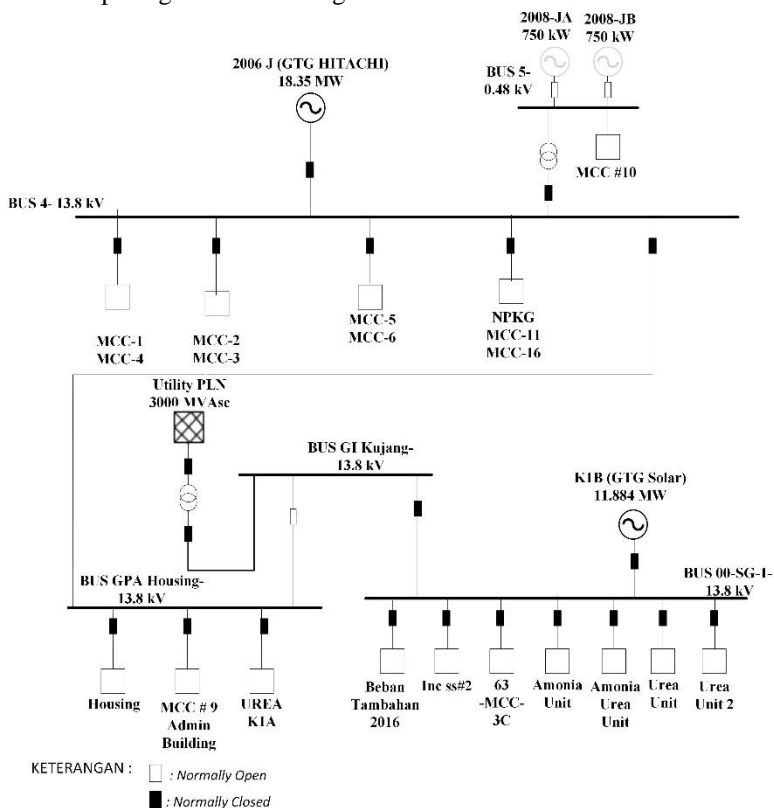
----- *Halaman ini sengaja dikosongkan* -----

BAB 3

SISTEM KELISTRIKAN PT. PUPUK KUJANG

3.1 Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kujang

Sistem kelistrikan di PT. Pupuk Kujang merupakan pabrik penghasil pupuk yang terletak di Cikampek, Jawa Barat. PT. Pupuk Kujang mempunyai dua pabrik yaitu pabrik K-1A dan pabrik K-1B dengan total beban 14,8 MW. Saat ini sistem kelistrikan di suplai dua buah generator dan *utility* dari PLN. Sistem kelistrikan secara lengkap dapat dilihat pada gambar 3.1 sebagai berikut ini.



Gambar 3.1 Single Line Diagram PT. Pupuk Kujang

3.2 Data Kelistrikan PT. Pupuk Kujang

Secara keseluruhan sistem kelistrikan yang ada di PT. Pupuk Kujang memiliki data total pembangkitan, pembebanan, dan kebutuhan daya seperti yang disajikan dalam tabel 3.1 sebagai berikut.

Tabel 3.1 Data Total Pembangkitan, Pembebanan, dan Kebutuhan Daya

Keterangan	MW	MVA _r	MVA	%PF
<i>Source (Swing bus)</i>	6,318	5,288	8,256	76,67 lag
<i>Source (non-swing Bus)</i>	11,5	7,125	13,528	85,00 lag
<i>Total demand</i>	17,816	12,414	21,714	82,04 lag
<i>Total Motor Load</i>	10,022	6,684	12,046	83,19 lag
<i>Total Static Load</i>	0,394	0,295	0,492	80,04 lag
<i>Apparent Losses</i>	0,186	0,776	0,798	

3.2.1 Sistem Pembangkitan PT. Pupuk Kujang

Sistem kelistrikan di PT. Pupuk Kujang di suplai dengan dua generator utama dengan spesifikasi yang disajikan pada tabel 3.2 sebagai berikut.

Tabel 3.2 Data Spesifikasi Generator

Spesifikasi	2006 J (GTG Hitachi)	K1B (GTG Solar)
Rating (MW)	18,35	11,884
Daya mampu (MW)	14,68	9,5
Tegangan (kV)	13,8	13,8
Frekuensi (Hz)	50	50
Kecepatan (rpm)	3000	3000
PF (%)	85	80
FLA (A)	903,2	621,5
Tipe <i>Exciter</i>	ST-1	ST-1
Tipe <i>Governor</i>	2301	2301
<i>Inertia</i>	1,2	1,2
<i>Damping</i>	0	0

3.2.2 Data Transformator pada PT. Pupuk Kujang

Sistem kelistrikan di PT. Pupuk Kujang dibagi atas beberapa nilai level tegangan yang berbeda. Oleh karena itu dibutuhkan transformator untuk merubah level tegangan sesuai kebutuhan dari peralatan listrik yang ada. Berikut ini merupakan data spesifikasi transformator yang ada di sistem kelistrikan PT. Pupuk Kujang.

Tabel 3.3 Data Spesifikasi Transformator

ID	Tegangan	Kapasitas	%Z	Hubungan
00-TR-2	13,8 / 2,4 kV	6 MVA	4,5	delta/wye
61-TR-3	13,8 / 0,4 kV	1,25 MVA	5	delta/wye
62-TR-3A	13,8 / 0,4 kV	1,6 MVA	6,3	delta/wye
62-TR-3B	13,8 / 0,4 kV	1,6 MVA	6,5	delta/wye
63-TR-2	13,8 / 2,4 kV	6 MVA	4,5	delta/wye
63-TR-3A	13,8 / 0,4 kV	1,6 MVA	6,5	delta/wye
63-TR-3B	13,8 / 0,4 kV	1,6 MVA	6,5	delta/wye
63-TR-3C	13,8 / 0,4 kV	1 MVA	5,75	delta/wye
T4	13,8 / 13,8 kV	10 MVA	3,1	delta/wye
T9	150 / 13,8 kV	20 MVA	9,5	wye/wye
T18	13,8 / 0,38 kV	0,63 MVA	5,75	delta/wye
T20	13,8 / 0,38 kV	0,63 MVA	5,75	delta/wye
T21	13,8 / 0,38 kV	0,63 MVA	5,75	delta/wye
T23	13,8 / 0,38 kV	0,63 MVA	5,75	delta/wye
T24	13,8 / 0,38 kV	0,63 MVA	5,75	delta/wye
T25	13,8 / 0,38 kV	0,63 MVA	5,75	delta/wye
TOYO Transf.2	2,3 / 0,48 kV	2,5 MVA	8,24	delta/wye
TR X-LAMELA/ANCO	0,44 / 0,23 kV	0,25 MVA	4,8	delta/wye
TR-1	13,8 / 0,48 kV	1,25 MVA	9	delta/wye
TR-2	13,8 / 0,48 kV	1,25 MVA	9	delta/wye
TR3	13,8 / 2,4 kV	2,5 MVA	5,5	delta/wye
TR-4	13,8 / 2,4 kV	2,5 MVA	5,5	delta/wye
TR-5	13,8 / 0,48 kV	1,25 MVA	9	delta/wye
TR-6	13,8 / 0,48 kV	1,25 MVA	9	delta/wye
TR-8	13,8 / 2,4 kV	7,5 MVA	5,53	delta/wye
TR-9	13,8 / 0,48 kV	1,25 MVA	9,13	delta/wye

Tabel 3.3 Data Spesifikasi Transformator (lanjutan)

ID	Tegangan	Kapasitas	%Z	Hubungan
TR-10	0,48 / 13,8 kV	3,75 MVA	5,75	delta/wye
TR-11	13,8 / 0,48 kV	1,25 MVA	9	delta/wye
TR-14	13,8 / 0,38 kV	1 MVA	5,75	delta/wye
TR-15	13,8 / 0,48 kV	1,25 MVA	9	delta/wye
TR-16	13,8 / 0,38 kV	0,5 MVA	5,75	delta/wye
TR-18	13,8 / 0,38 kV	0,5 MVA	8	delta/wye

3.2.3 Data Kabel pada PT. Pupuk Kujang

Pada sistem kelistrikan yang ada di PT. Pupuk Kujang terdapat kabel-kabel yang menjadi penghubung antara suplai dengan beban-beban yang ada. Berikut ini merupakan data spesifikasi kabel yang ada di PT. Pupuk Kujang.

Tabel 3.4 Data Spesifikasi Kabel

ID	Tegangan	Panjang	Tipe
F2	15 kV	840 m	1 - 3/C 70
F2'	15 kV	840 m	1 - 3/C 70
F2'A	15 kV	20 m	1 - 3/C 70
F2'B	15 kV	1107 m	1 - 3/C 70
F2'C	15 kV	20 m	1 - 3/C 70
F3	15 kV	381 m	1 - 3/C 240
F4	15 kV	325 m	1 - 3/C 70
F4-A	15 kV	375 m	1 - 3/C 70
F-5	15 kV	321 m	1 - 3/C 70
F5A	15 kV	375 m	1 - 3/C 70
F6A	15 kV	35 m	1 - 3/C 240
F6B	15 kV	535 m	1 - 3/C 240
F7A	15 kV	375 m	1 - 3/C 240
F7B	15 kV	760 m	1 - 3/C 240
F9	15 kV	8 m	1 - 3/C 70
F11	15 kV	105 m	3 - 3/C 240

Tabel 3.4 Data Spesifikasi Kabel (lanjutan)

ID	Tegangan	Panjang	Tipe
2003 K	0,6 kV	330 m	1 - 3/C 120
Cable4	3,3 kV	145 m	1 - 3/C 25
Cable6	3,3 kV	125 m	1 - 3/C 25
Cable11	3,3 kV	160 m	1 - 3/C 25
Cable12	3,3 kV	140 m	1 - 3/C 25
Cable13	3,3 kV	120 m	2 - 3/C 120
Cable14	3,3 kV	260 m	1 - 3/C 25
Cable15	3,3 kV	385 m	1 - 3/C 50
Cable50	3,3 kV	120 m	1 - 3/C 185
Cable490	0,6 kV	212 m	1 - 3/C 6
Cable492	0,6 kV	213 m	1 - 3/C 6
Cable494	0,6 kV	96 m	1 - 3/C 6
Cable495	0,6 kV	116 m	1 - 3/C 25
Cable497	0,6 kV	116 m	1 - 3/C 25
Cable498	0,6 kV	185 m	1 - 3/C 95
Cable500	0,6 kV	96 m	1 - 3/C 6
Cable501	0,6 kV	184 m	1 - 3/C 95
Cable503	0,6 kV	183 m	1 - 3/C 95
Cable505	0,6 kV	82 m	1 - 3/C 6
Cable507	0,6 kV	81 m	1 - 3/C 6
Cable510	0,6 kV	77 m	1 - 3/C 6
Cable511	0,6 kV	77 m	1 - 3/C 6
Cable513	0,6 kV	124 m	1 - 3/C 6
Cable515	0,6 kV	280 m	1 - 3/C 6
Cable516	0,6 kV	155 m	1 - 3/C 10
Cable518	0,6 kV	155 m	1 - 3/C 10
Cable519	0,6 kV	80 m	1 - 3/C 6

3.2.4 Data Motor pada PT. Pupuk Kujang

Pada sistem kelistrikan di PT. Pupuk Kujang memiliki beban berupa motor induksi untuk menunjang proses produksi yang ada. Berikut ini merupakan data spesifikasi motor-motor yang ada di PT. Pupuk Kujang.

Tabel 3.5 Data Spesifikasi Motor

ID	Jenis	Rating Daya	Rating Tegangan (kV)	% PF
101 BJT	Induction	1.5 HP	0.44	82.01
101-J/LO	Induction	55 kW	0.44	80
101-LJM	Induction	190 kW	0.44	80
102-U1	Induction	1 HP	0.44	80
102-U2	Induction	1 HP	0.44	80
102-U3	Induction	1 HP	0.44	80
102-U4	Induction	1 HP	0.44	80
103-J/LOM	Induction	75 HP	0.44	80
103-J/SO	Induction	50 HP	0.44	80
104-J/LO	Induction	2 HP	0.44	80
204-JCM	Induction	400 HP	2.3	80
2003-JA2	Induction	375 kW	2.3	92,09
2004-JEM	Induction	400 HP	2.3	91,99
2204-U1	Induction	150 kW	2.4	80
2204-U2	Induction	200 HP	2.4	80
2204-U3	Induction	150 kW	2.4	80
2204-U4	Induction	200 HP	2.4	80
2204-U5	Induction	150 kW	2.4	80
A-101-BJ3AM	Induction	2.2 kW	0.38	78,24
A-101-BJ3BM	Induction	2.2 kW	0.38	78,24
A-101-BJ3CM	Induction	2.2 kW	0.38	78,24
A-101-BJ3DM	Induction	2.2 kW	0.38	78,24
A-101-BJ3EM	Induction	2.2 kW	0.38	78,24

Tabel 3.5 Data Spesifikasi Motor (Lanjutan)

ID	Jenis	Rating Daya	Rating Tegangan (kV)	% PF
C-GA2001CM	Induction	1150 kW	2.3	79,81
C-GB2001AM	Induction	132 kW	0.38	91
C-GB2001BM	Induction	132 kW	0.38	91
C-GB2001CM	Induction	132 kW	0.38	91
C-GB2001DM	Induction	132 kW	0.38	91
C-GB2001EM	Induction	132 kW	0.38	91
C-GB2001FM	Induction	132 kW	0.38	91
C-GB2101AM	Induction	150 kW	0.38	91
A-106-LJM	Induction	0.37 kW	0.38	89

3.2.5 Sistem Pengaman Arus Lebih

Sistem pengaman arus lebih dibutuhkan untuk melindungi sistem dari gangguan arus lebih yang terdapat pada fasa maupun sistem pentanahan agar proses pengolahan dan produksi agar tidak terhenti atau terganggu. Untuk itu peralatan pengaman harus terkoordinasi dengan baik sehingga ketika terjadi gangguan arus lebih peralatan pengaman tersebut dapat mengisolir daerah gangguan secepat mungkin.

Pada PT. Pupuk Kujang, digunakan rele arus lebih dengan produsen (*manufacturer*) berbeda-beda. Dalam pengaturan rele arus lebih diperlukan nilai-nilai konstanta dari setiap produk, yang nilainya bervariasi antara satu *manufacturer* dengan *manufacturer* lainnya. Berikut adalah detail dari setiap rele arus lebih yang akan diatur pada tugas akhir ini:

1. Schneider Electric Sepam Series 10 :

Overcurrent

Pickup Range : 0.1 – 2.4 x Sekunder CT

Curve type : IEC, IEEE

Instantaneous

Pickup Range : 0.1 – 24 x Sekunder CT

Delay Range : 0.05 – 300 detik

2. Merlin Gerin Sepam 20 :
- Overcurrent*
 - Pickup Range* : 0.1 – 2.4 x Sekunder CT
 - Curve type* : IEC, IAC, IEEE
 - Instantaneous*
 - Pickup Range* : 0.1 – 24 x Sekunder CT
 - Delay Range* : 0.05 – 300 detik
3. Schneider Electric Sepam Series 20 :
- Overcurrent*
 - Pickup Range* : 0.1 – 2.4 x Sekunder CT
 - Curve type* : IEC, IEEE
 - Instantaneous*
 - Pickup Range* : 0.1 – 24 x Sekunder CT
 - Delay Range* : 0.05 – 300 detik

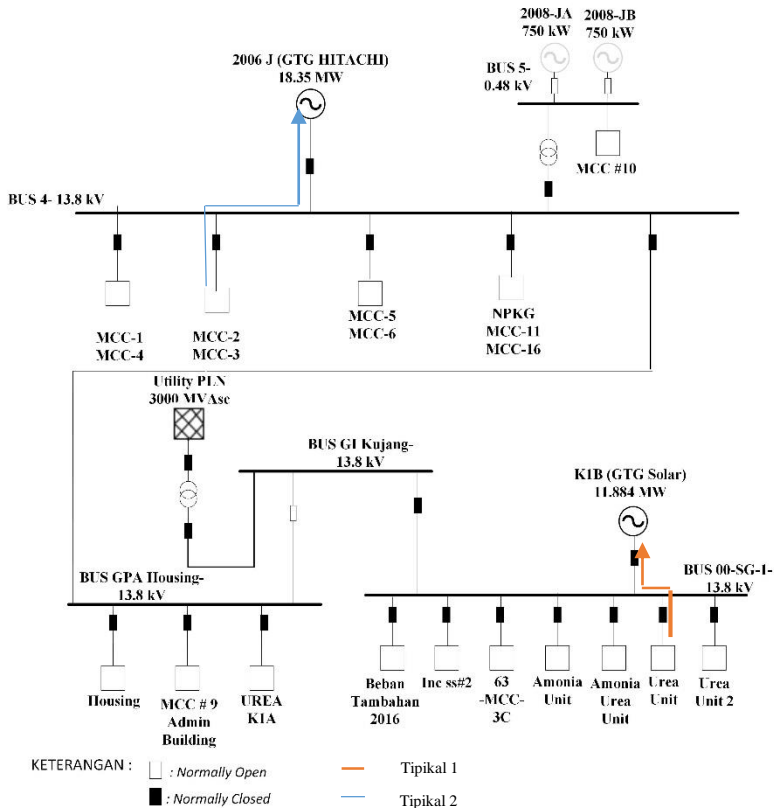
BAB 4

HASIL SIMULASI DAN ANALISA KOORDINASI PROTEKSI MEMPERHITUNGKAN ARC FLASH PADA PT. PUPUK KUJANG

4.1 Pemodelan Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kujang

Pada bab ini akan dibahas mengenai simulasi dan hasil analisis pada sistem kelistrikan PT. Pupuk Kujang. Untuk pemodelan sistem kelistrikan PT. Pupuk Kujang dilakukan dengan menggambar single line diagram pada *software* ETAP 12.6. dalam membuat *single line diagram* dibutuhkan data peralatan seperti data motor, trafo, PLN, bus, dan rele. Setelah mengetahui data – data tersebut, didapatkan hasil analisis aliran daya dan koordinasi proteksi pada PT. Pupuk Kujang. Langkah selanjutnya adalah melakukan simulasi hubung singkat tiga fasa dan hubung singkat antar fasa yang bertujuan untuk mengetahui besar arus yang melewati tiap bus saat pada pembebanan maksimum dan juga menganalisa bahaya busur api yang dilakukan dengan mensimulasikan busur api untuk mengetahui nilai insidem energi yang terjadi, kategori *personal protective equipment*, jarak aman perlindungan dan rekomendasi untuk mengurangi bahaya busur api. Setelah mensimulasikan *short circuit* (hubung singkat) dilakukan pemilihan rele pengaman.

4.2 Pemilihan Tipikal Koordinasi Proteksi Sistem Kelistrikan Pada PT. Pupuk Kujang



Gambar 4.1 Single Line Diagram Tipikal PT. Pupuk Kujang

4.3 Analisis Arus Gangguan Hubung Singkat

Untuk mengatur rele pengamanan arus lebih perlu dilakukan analisis gangguan hubung singkat disetiap bus pada tipikal yang telah dipilih. Gangguan hubung singkat yang digunakan yaitu arus gangguan minimum dan arus gangguan maksimum. Nilai arus hubung singkat minimum adalah saat terjadi gangguan hubung singkat 2 fasa, yaitu gangguan pada saat 30 *cycle*. Sedangkan untuk arus gangguan maksimum adalah ketika

terjadi gangguan 3 fasa, pada saat 4 *cycle*. Analisa hubung singkat maksimum cukup dilakukan pada 4 *cycle* . Nilai gangguan tersebut digunakan untuk mensetting rele arus lebih.

4.3.1 Analisis Hubung Singkat Minimum

Untuk *setting* rele pengamanan arus lebih digunakan nilai arus hubung singkat 2 fasa pada saat 30 *cycle*. Hal ini digunakan untuk membatasi *setting* arus sebagai batasan *pickup* rele arus lebih *instant*. Sehingga saat terjadi hubung singkat minimum rele tersebut langsung bekerja sesuai *time delay* yang telah ditentukan. Pada simulasi gangguan hubung singkat minimum dilakukan di setiap bus dalam sistem kelistrikan di PT. Pupuk Kujang. Pada Tabel 4.1 merupakan hasil simulasi dari arus gangguan 30 *cycle*

Tabel 4.1 Data Arus Hubung Singkat Minimum Pada Bus Utama

No	ID Bus	Tegangan	Arus hubung singkat 2 fasa 30 <i>cycle</i>
1	GI Kujang	13.8 kV	13.67 kA
2	BUSBAR-II	13.8 kV	13.36 kA
3	00-SG-01	13.8 kV	13.67 kA
4	63-LBS-1A	13.8 kV	12.19 kA
5	BUSBAR-1	13.8 kV	11.43 kA
6	62-MCC-2	2.4 kV	19,11 kA
7	MCC-8	2.4 kV	23.78 kA

4.3.2 Analisis Hubung Singkat Maksimum

Arus hubung singkat maksimum adalah arus hubung singkat 3 fasa pada saat 4 *cycle*, digunakan hubung singkat ketika 4 *cycle* karena rele arus lebih akan bekerja saat 3-5 *cycle*. Arus hubung singkat maksimum digunakan untuk membatasi arus hubung singkat terbesar yang mungkin terjadi. Arus hubung singkat maksimum saat 4 *cycle* digunakan untuk *setting* rele arus lebih dengan *time delay* antara 0,08 sekon sampai 0,5 sekon. Hasil simulasi hubung singkat maksimum dapat dilihat pada Tabel 4.2 di bawah ini :

Tabel 4.2 Data Arus Hubung Singkat Maksimum Pada Bus Utama

No	ID Bus	Tegangan	Arus hubung singkat 3 fasa 4 cycle
1	GI Kujang	13.8 kV	16.07 kA
2	BUSBAR-II	13.8 kV	15.84 kA
3	00-SG-01	13.8 kV	16.03 kA
4	63-LBS-1A	13.8 kV	14.7 kA
5	BUSBAR-1	13.8 kV	14.7 kA
6	62-MCC-2	2.4 kV	23.61 kA
7	MCC-8	2.4 kV	25.92 kA

4.4 Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Fasa

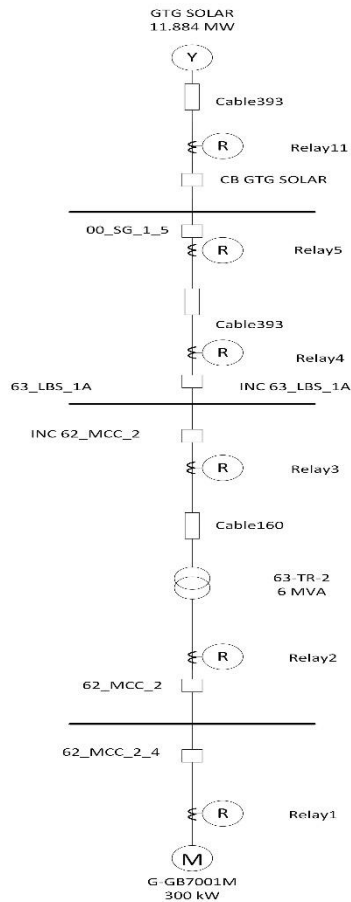
Dalam koordinasi rele arus lebih gangguan fasa *setting* masing – masing rele pada setiap peralatan harus bekerja sesuai dengan *setting* waktu yang telah ditentukan. Koordinasi ini berfungsi untuk gangguan arus lebih fasa saja. Gangguan tersebut adalah *short circuit* dan *over load*. Untuk mendesain koordinasi proteksi yang baik dan benar akan menjamin kontinuitas pada proses industri. Pada koordinasi rele arus lebih dilakukan *setting* arus dan waktu pada rele arus lebih (50/51). Sesuai standart IEEE 242, *grading time* untuk rele digital adalah 0,2 sampai 0,4 detik. Setelah dilakukan perhitungan untuk menentukan nilai *pick up low set*, *pick up high set*, *time delay* dan *time dial*, selanjutnya kurva koordinasi tipikal diplot pada *Star-Protective Device Coordination*. *Plotting* ini bertujuan untuk melihat *time current curve*, apakah koordinasi rele telah tepat atau belum. Rele pengaman juga memperhatikan arus kontribusi yang melewati ke peralatan yang akan di proteksi dan arus pengisian (*inrush current*) pada trafo

4.4.1 Koordinasi Rele Arus Lebih Tipikal 1

Tipikal 1 merupakan tipikal dengan beban motor terbesar yang aktif pada PT. Pupuk Kujang. Tipikal ini dimulai dari beban motor G-GB7001M menuju generator GTG SOLAR, melalui saluran Cable393

dan Cable1. Tipikal ini melalui trafo 63-TR-2 dengan kapasitas 6 MVA. Tipikal ini terdiri dari dua level tegangan, yaitu 13.8 kV dan 2.4 kV.

Koordinasi rele arus lebih tipikal 1 pada kondisi eksisting ini mengkoordinasikan Reley1, Reley2, Reley3, Reley4, Reley5 dan Reley11. Koordinasi rele arus lebih Tipikal 1 pada kondisi eksisting dipresentasikan melalui Gambar 4.2 di bawah ini :



Gambar 4.2 *Single Line Diagram* Tipikal 1

4.4.1.1 Pick-up Rele Eksisting Tipikal 1

Berikut adalah setting reley waktu eksisting untuk tipikal 1 :

Tabel 4.3 Data *Setting* Rele 1 Eksisting

Reley1	
<i>Manufacture</i>	Schneider Electric – Sepam Series 10
<i>Model</i>	MC Set LF ₁
<i>Curve Type</i>	<i>Standard Inverse</i>
Ratio	100 : 5
FLA Motor	87,57 A
LRC Motor	612.99 A
Isc kontribusi Min	20,39 kA
Isc kontribusi Max Motor G-GB7001M	0,44 kA

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA motor} \leq I_{\text{lowset}} \leq 1,4 \times \text{FLA motor}$$

$$1,05 \times 87,57 \leq I_{\text{lowset}} \leq 1,4 \times 87,57$$

$$91,94 \leq I_{\text{lowset}} \leq 122,6$$

$$\frac{91,94}{100} I_n \leq \text{Tap} \leq \frac{122,6}{100} I_n$$

$$0,92 I_n \leq \text{Tap} \leq 1,22 I_n$$

$$\text{Dipilih Tap } 0,96 I_n = (0,96 \times 100) = 96 \text{ A}$$

Time Dial

Dipilih waktu operasi (t) = 0,1 detik

$$t = \left(\frac{0,14}{(M^{0,02} - 1)} \right) \times \frac{T_d}{2,97}$$

$$T_d = \frac{0,1 \times 2,97 \left[\left(\frac{1}{I_{\text{pickup}}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{0,1 \times 2,97 \left[\left(\frac{I_{\text{sc kontribusi Motor}}}{\text{tap} \times \text{CT primary}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{0,1 \times 2,97 \left[\left(\frac{440}{96} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = 0,06 \text{ dipilih } T_d = 0,3$$

Instantaneous Pickup

Istart motor $\leq I_{\text{highset}} \leq 0,8 \times \text{Isc Min Bus 3}$

$$612,99 \leq I_{\text{highset}} \leq 0,8 \times 20390$$

$$612,99 \leq I_{\text{highset}} \leq 6689$$

$$\frac{612,99}{100} \text{ In} \leq \text{Tap} \leq \frac{16312}{100} \text{ In}$$

$$6,12 \text{ In} \leq \text{Tap} \leq 163,12 \text{ In}$$

Dipilih Tap 10 In = (10 x 100)
= 1000 A

Time Delay

Time delay dipilih 0,1 detik

Tabel 4.4 Data Setting Rele 2 Eksisting

Reley2	
<i>Manufacture</i>	Schneider Electric – Sepam Series 10
<i>Model</i>	MC Set LF ₁
<i>Curve Type</i>	<i>Standard Inverse</i>
Ratio	1600 : 5
FLA sekunder Trafo 63-TR-2	1443 A
Isc Min	19110 kA
Isc Max bus 62-MCC-2	23,61 kA

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA} \leq I_{\text{lowset}} \leq 1,4 \times \text{FLA}$$

$$1,05 \times 1443 \leq I_{\text{lowset}} \leq 1,4 \times 1443$$

$$1515,15 \leq I_{\text{lowset}} \leq 2020,2$$

$$\frac{1515,5}{1600} \text{ In} \leq \text{Tap} \leq \frac{2020,2}{1600} \text{ In}$$

$$0,95 \text{ In} \leq \text{Tap} \leq 1,26 \text{ In}$$

Dipilih Tap 0,99 In = (0,99 x 1600) = 1584 A

Time Dial

Dipilih waktu operasi (t) = 0,3 detik

$$t = \left(\frac{0,14}{(M^{0,02} - 1)} \right) \times \frac{Td}{2,97}$$
$$Td = \frac{0,3 \times 2,97 \left[\left(\frac{1}{I_{\text{pickup}}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{0,3 \times 2,97 \left[\left(\frac{I_{sc \text{ max bus 62-MCC-2}}}{\text{tap x CT primary}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{0,3 \times 2,97 \left[\left(\frac{23610}{1584} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = 0,35 \text{ dipilih } T_d = 0,4$$

Instantaneous Pickup

$$1,6 \times \text{FLA} \leq I_{\text{highset}} \leq 0,8 \times I_{sc \text{ Min}}$$

$$2308,8 \leq I_{\text{highset}} \leq 0,8 \times 19110$$

$$2308,8 \leq I_{\text{highset}} \leq 15288$$

$$\frac{2308,8}{1600} \text{ In} \leq \text{Tap} \leq \frac{15288}{1600} \text{ In}$$

$$1,44 \text{ In} \leq \text{Tap} \leq 9,55 \text{ In}$$

$$\begin{aligned} \text{Dipilih Tap } 3.125 \text{ In} &= (3.125 \times 1600) \\ &= 5000 \text{ A} \end{aligned}$$

Time Delay

Time delay dipilih 0,3 detik

Tabel 4.5 Data Setting Rele 3 Eksisting

Reley3	
<i>Manufacture</i>	Merlin Gerin Sepam 20
<i>Model</i>	MC Set LF ₁
<i>Curve Type</i>	IEC - Standard Inverse
<i>Ratio</i>	300 : 5
FLA Primer Trafo 63-TR-2	251 A
Isc Min bus 63-LBS-1A	10710 kA
Isc Max bus 63-LBS-1A	14,7 kA

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA} \leq I_{\text{lowset}} \leq 1,4 \times \text{FLA}$$

$$1,05 \times 251 \leq I_{\text{lowset}} \leq 1,4 \times 251$$

$$263,55 \leq I_{\text{lowset}} \leq 351,4$$

$$\frac{263,55}{300} \text{ In} \leq \text{Tap} \leq \frac{351,4}{300} \text{ In}$$

$$0,88 \text{ In} \leq \text{Tap} \leq 1,17 \text{ In}$$

$$\text{Dipilih Tap 1 In} = (1 \times 300) = 300 \text{ A}$$

Time Dial

Dipilih waktu operasi (t) = 0,1

$$t = \left(\frac{0,14}{(M^{0,02}-1)} \right) \times \frac{T_d}{2,97}$$
$$T_d = \frac{0,1 \times 2,97 \left[\left(\frac{1}{I_{pickup}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$
$$T_d = \frac{0,1 \times 2,97 \left[\left(\frac{I_{sc \max \text{ bus 63-LBS-1A}}}{\text{tap x CT primary}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$
$$T_d = \frac{0,1 \times 2,97 \left[\left(\frac{14700}{300} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

Td = 0,02 dipilih Td = 0,77

Instantaneous Pickup

$1,6 \times \text{FLA} \leq I_{\text{highset}} \leq 0,8 \times I_{sc \text{ Min}}$

$263,55 \leq I_{\text{highset}} \leq 0,8 \times 10710$

$263,55 \leq I_{\text{highset}} \leq 8568$

$\frac{263,55}{300} I_n \leq \text{Tap} \leq \frac{8568}{300} I_n$

$1,33 I_n \leq \text{Tap} \leq 28,56 I_n$

Dipilih Tap 7 $I_n = (7 \times 300)$
 $= 2100 \text{ A}$

Time Delay

Time delay dipilih 0,1 detik

Tabel 4.6 Data Setting Rele 4 Eksisting

Reley4	
<i>Manufacture</i>	Merlin Gerin Sepam 20
<i>Model</i>	MC Set LF ₁
<i>Curve Type</i>	IEC - Standard Inverse
<i>Ratio</i>	500 : 5
<i>FLA</i>	384,88 A
<i>Isc Min bus 63-LBS-1A</i>	10710 kA
<i>Isc Max bus 63-LBS-1A</i>	14,7 kA

Time Overcurrent Pickup

$1,05 \times \text{FLA} \leq I_{\text{lowset}} \leq 1,4 \times \text{FLA}$

$1,05 \times 384,88 \leq I_{\text{lowset}} \leq 1,4 \times 384,88$

$$404,124 \leq I_{\text{lowset}} \leq 538,83$$

$$\frac{404,124}{500} \text{ In} \leq \text{Tap} \leq \frac{538,83}{500} \text{ In}$$

$$0,81 \text{ In} \leq \text{Tap} \leq 1 \text{ In}$$

$$\text{Dipilih Tap } 0,85 \text{ In} = (0,85 \times 500) = 425 \text{ A}$$

Time Dial

Dipilih waktu operasi (t) = 0,3

$$t = \left(\frac{0,14}{(M^{0,02} - 1)} \right) \times \frac{T_d}{2,97}$$

$$T_d = \frac{0,3 \times 2,97 \left[\left(\frac{1}{I_{pickup}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{0,3 \times 2,97 \left[\left(\frac{I_{sc \text{ max bus 63-LBS-1A}}}{\text{tap} \times C_T \text{ primary}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{0,3 \times 2,97 \left[\left(\frac{14700}{300} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = 0,51 \text{ dipilih } T_d = 3$$

Instantaneous Pickup

$$1,6 \times \text{FLA} \leq I_{\text{highset}} \leq 0,8 \times I_{sc \text{ Min}}$$

$$615,8 \leq I_{\text{highset}} \leq 0,8 \times 10710$$

$$615,8 \leq I_{\text{highset}} \leq 8568$$

$$\frac{615,8}{500} \text{ In} \leq \text{Tap} \leq \frac{8568}{500} \text{ In}$$

$$1,23 \text{ In} \leq \text{Tap} \leq 17,13 \text{ In}$$

$$\text{Dipilih Tap } 12 \text{ In} = (12 \times 500) = 6000 \text{ A}$$

Time Delay

Time delay dipilih 0,3 detik

Tabel 4.7 Data Setting Rele 5 Eksisting

Reley5	
<i>Manufacture</i>	Merlin Gerin Sepam 20
<i>Model</i>	MC Set LF ₁
<i>Curve Type</i>	IEC - Standard Inverse
Ratio	500 : 5
FLA	384,88 A
Isc Min bus 00-SG-01	11580 kA
Isc Max bus 00-SG-01	17,71 kA

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA} \leq I_{\text{lowset}} \leq 1,4 \times \text{FLA}$$

$$1,05 \times 384,88 \leq I_{\text{lowset}} \leq 1,4 \times 384,88$$

$$404,124 \leq I_{\text{lowset}} \leq 538,83$$

$$\frac{404,124}{500} I_n \leq \text{Tap} \leq \frac{538,83}{500} I_n$$

$$0,81 I_n \leq \text{Tap} \leq 1 I_n$$

$$\text{Dipilih Tap } 0,85 I_n = (0,85 \times 500) = 425 \text{ A}$$

Time Dial

$$\text{Dipilih waktu operasi } (t) = 0,3$$

$$t = \left(\frac{0,14}{(M^{0,02} - 1)} \right) \times \frac{T_d}{2,97}$$

$$T_d = \frac{0,3 \times 2,97 \left[\left(\frac{1}{I_{\text{pickup}}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{0,3 \times 2,97 \left[\left(\frac{I_{\text{sc max 00-SG-01}}{\text{tap} \times \text{CT primary}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{0,3 \times 2,97 \left[\left(\frac{17710}{500} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = 0,47 \text{ dipilih } T_d = 3,1$$

Instantaneous Pickup

$$1,6 \times \text{FLA} \leq I_{\text{highset}} \leq 0,8 \times I_{\text{sc Min}}$$

$$615,8 \leq I_{\text{highset}} \leq 0,8 \times 11580$$

$$615,8 \leq I_{\text{highset}} \leq 9264$$

$$\frac{615,8}{500} I_n \leq \text{Tap} \leq \frac{9264}{500} I_n$$

$$1,23 \text{ In} \leq \text{Tap} \leq 18,52 \text{ In}$$

$$\text{Dipilih Tap } 12 \text{ In} = (12 \times 500)$$

$$= 6000 \text{ A}$$

Time Delay

Time delay dipilih 0,3

Tabel 4.8 Data Setting Rele 11 Eksisting

Reley11	
<i>Manufacture</i>	Schneider Electric Sepam Series 10
<i>Model</i>	MC Set LF ₁
<i>Curve Type</i>	IEC - Standard Inverse
<i>Ratio</i>	700 : 5
FLA GTG Solar	621,5 A
Isc Min 00-SG-01	11530 kA
Isc Max 00-SG-01	17,71 kA

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA} \leq I_{\text{lowset}} \leq 1,4 \times \text{FLA}$$

$$1,05 \times 621,5 \leq I_{\text{lowset}} \leq 1,4 \times 621,5$$

$$652,57 \leq I_{\text{lowset}} \leq 870,1$$

$$\frac{652,57}{700} \text{ In} \leq \text{Tap} \leq \frac{870,1}{700} \text{ In}$$

$$0,93 \text{ In} \leq \text{Tap} \leq 1,24 \text{ In}$$

$$\text{Dipilih Tap } 0,98 \text{ In} = (0,98 \times 700) = 686 \text{ A}$$

Time Dial

Dipilih waktu operasi (t) = 0,7 detik

$$t = \left(\frac{0,14}{(M^{0,02} - 1)} \right) \times \frac{Td}{2,97}$$

$$Td = \frac{0,7 \times 2,97 \left[\left(\frac{I}{I_{\text{pickup}}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$Td = \frac{0,7 \times 2,97 \left[\left(\frac{I_{\text{sc max bus 00-SG-01}}{\text{tap} \times \text{CT primary}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$Td = \frac{0,7 \times 2,97 \left[\left(\frac{17710}{700} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$Td = 0,99 \text{ dipilih } Td = 2$$

Instantaneous Pickup

$$1,6 \times \text{FLA} \leq I_{\text{highset}} \leq 0,8 \times I_{\text{sc Min}}$$

$$994,4 \leq I_{\text{highset}} \leq 0,8 \times 11530$$

$$994,4 \leq I_{\text{highset}} \leq 9224$$

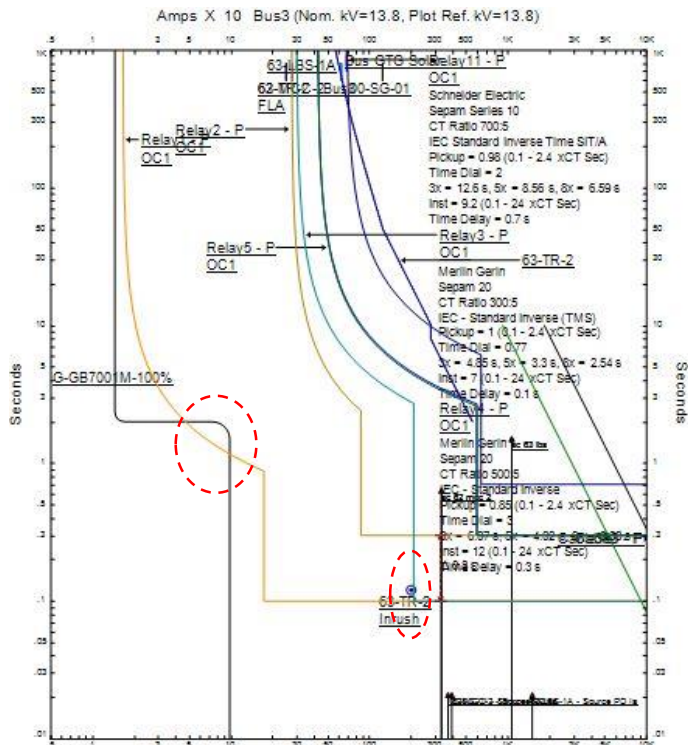
$$\frac{994,4}{700} I_n \leq \text{Tap} \leq \frac{9224}{700} I_n$$

$$1,42 I_n \leq \text{Tap} \leq 13,1 I_n$$

$$\text{Dipilih Tap } 9.2 I_n = (9.2 \times 700)$$

$$= 6440 \text{ A}$$

Untuk menganalisa kurva TCC, perlu dilakukan *plotting* pada *Single Line Diagram* Tipikal 1 saat kondisi eksisting. Gambar 4.3 merupakan *Time Current Curve* dari Tipikal 1.



Gambar 4.3 Hasil *Plot* Eksisting Rele Gangguan Fasa Tipikal 1

Hasil analisa menunjukan saat motor G-GB7001M starting, motor akan mati terlebih dahulu. Hal ini disebabkan kurva motor dengan Reley1 bersinggungan seperti yang terlihat pada Gambar 4.3.

Selain itu, pada Gambar 4.3 dapat dilihat juga bahwa inrush pada trafo 63-TR-2 menyentuh kurva reley3. Hal ini menyebabkan reley3 akan trip saat trafo di *energize* pertama kali.

4.4.1.2 Analisis Perhitungan Resetting Tipikal 1

Analisis perhitungan harus memperhatikan manufaktur rele yang dipakai dan *grading time*. Perhitungan ulang *setting* rele tersebut adalah sebagai berikut :

Tabel 4.9 Data *Setting* Rele 1 *Resetting*

Reley1	
<i>Manufacture</i>	Schneider Electric – Sepam Series 10
<i>Model</i>	MC Set LF ₁
<i>Curve Type</i>	<i>Standard Inverse</i>
Ratio	100 : 5
FLA Motor	87,57 A
LRC Motor	612.99 A
Isc kontribusi Min	20,39 kA
Isc kontribusi Max Motor G-GB7001M	0,44 kA

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA motor} \leq I_{\text{lowset}} \leq 1,4 \times \text{FLA motor}$$

$$1,05 \times 87,57 \leq I_{\text{lowset}} \leq 1,4 \times 87,57$$

$$91,94 \leq I_{\text{lowset}} \leq 122,6$$

$$\frac{91,94}{100} I_n \leq \text{Tap} \leq \frac{122,6}{100} I_n$$

$$0,92 I_n \leq \text{Tap} \leq 1,22 I_n$$

$$\text{Dipilih Tap } 0,96 I_n = (0,96 \times 100) = 96 \text{ A}$$

Time Dial

$$\text{Dipilih waktu operasi (t) = 0,1 detik}$$

$$t = \left(\frac{0,14}{(M^{0,02}-1)} \right) \times \frac{Td}{2,97}$$

$$Td = \frac{0,1 \times 2,97 \left[\left(\frac{I}{I_{pickup}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$Td = \frac{0,1 \times 2,97 \left[\left(\frac{I_{sc \text{ kontribusi Motor}}}{\text{tap} \times CT \text{ primary}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$Td = \frac{0,1 \times 2,97 \left[\left(\frac{440}{96} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$Td = 0,06 \text{ dipilih } Td = 0,58$$

Instantaneous Pickup

Istart motor $\leq I_{highset} \leq 0,8 \times I_{sc \text{ Min Bus 3}}$

$$612,99 \leq I_{highset} \leq 0,8 \times 20390$$

$$612,99 \leq I_{highset} \leq 6689$$

$$\frac{612,99}{100} I_n \leq Tap \leq \frac{16312}{100} I_n$$

$$6,12 I_n \leq Tap \leq 163,12 I_n$$

Dipilih Tap 10 $I_n = (10 \times 100)$
 $= 1000 \text{ A}$

Time Delay

Time delay dipilih 0,1 detik

Tabel 4.10 Data Setting Rele 2 Resetting

Reley2	
<i>Manufacture</i>	Schneider Electric – Sepam Series 10
<i>Model</i>	MC Set LF ₁
<i>Curve Type</i>	IEC - Standard Inverse
<i>Ratio</i>	1600 : 5
FLA sekunder Trafo 63-TR-2	1443 A
Isc Min	19110 kA
Isc Max bus 62-MCC-2	23,61 kA

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times FLA \leq I_{lowset} \leq 1,4 \times FLA$$

$$1,05 \times 1443 \leq I_{lowset} \leq 1,4 \times 1443$$

$$1515,15 \leq I_{lowset} \leq 2020,2$$

$$\frac{1515,5}{1600} I_n \leq \text{Tap} \leq \frac{2020,2}{1600} I_n$$

$$0,95 I_n \leq \text{Tap} \leq 1,26 I_n$$

Dipilih Tap $0,99 I_n = (0,99 \times 1600) = 1584 \text{ A}$

Time Dial

Dipilih waktu operasi (t) = 0,3 detik

$$t = \left(\frac{0,14}{(M^{0,02} - 1)} \right) \times \frac{T_d}{2,97}$$

$$T_d = \frac{0,3 \times 2,97 \left[\left(\frac{1}{1, \text{pickup}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{0,3 \times 2,97 \left[\left(\frac{I_{sc \text{ max bus 62-MCC-2}}}{\text{tap} \times C_T \text{ primary}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{0,3 \times 2,97 \left[\left(\frac{23610}{1584} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$T_d = 0,35$ dipilih $T_d = 0,4$

Instantaneous Pickup

$$1,6 \times \text{FLA} \leq I_{\text{highset}} \leq 0,8 \times I_{sc \text{ Min}}$$

$$2308,8 \leq I_{\text{highset}} \leq 0,8 \times 19110$$

$$2308,8 \leq I_{\text{highset}} \leq 15288$$

$$\frac{2308,8}{1600} I_n \leq \text{Tap} \leq \frac{15288}{1600} I_n$$

$$1,44 I_n \leq \text{Tap} \leq 9,55 I_n$$

Dipilih Tap $3.125 I_n = (3.125 \times 1600)$
 $= 5000 \text{ A}$

Time Delay

Time delay dipilih 0,3 detik

Tabel 4.11 Data *Setting Rele 3 Resetting*

Reley3	
<i>Manufacture</i>	Merlin Gerin Sepam 20
<i>Model</i>	MC Set LF ₁
<i>Curve Type</i>	IEC – Standard Inverse
Ratio	300 : 5
FLA Primer Trafo 63-TR-2	251 A
Isc Min bus 63-LBS-1A	10710 kA
Isc Max bus 63-LBS-1A	14,7 kA

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA} \leq I_{\text{lowset}} \leq 1,4 \times \text{FLA}$$

$$1,05 \times 251 \leq I_{\text{lowset}} \leq 1,4 \times 251$$

$$263,55 \leq I_{\text{lowset}} \leq 351,4$$

$$\frac{263,55}{300} \text{ In} \leq \text{Tap} \leq \frac{351,4}{300} \text{ In}$$

$$0,88 \text{ In} \leq \text{Tap} \leq 1,17 \text{ In}$$

$$\text{Dipilih Tap 1 In} = (1 \times 300) = 300 \text{ A}$$

Time Dial

Dipilih waktu operasi (t) = 0,1 detik karena memungkinkan untuk koreset karena $I_{\text{sc max bus sekunder}} < I_{\text{set}} < 0,8 I_{\text{sc min bus primer}}$

$$t = \left(\frac{0,14}{(M^{0,02} - 1)} \right) \times \frac{T_d}{2,97}$$

$$T_d = \frac{0,1 \times 2,97 \left[\left(\frac{I}{I_{\text{pickup}}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{0,1 \times 2,97 \left[\left(\frac{I_{\text{sc max bus 63-LBS-1A}}{\text{tap} \times \text{CT primary}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{0,1 \times 2,97 \left[\left(\frac{14700}{300} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = 0,17 \text{ dipilih } T_d = 0,4$$

Instantaneous Pickup

$$1,6 \times \text{FLA} \leq I_{\text{highset}} \leq 0,8 \times I_{\text{sc Min}}$$

$$263,55 \leq I_{\text{highset}} \leq 0,8 \times 10710$$

$$263,55 \leq I_{\text{highset}} \leq 8568$$

$$\frac{263,55}{300} \text{ In} \leq \text{Tap} \leq \frac{8568}{300} \text{ In}$$

$$1,33 \text{ In} \leq \text{Tap} \leq 28,56 \text{ In}$$

$$\text{Dipilih Tap 12 In} = (12 \times 300) \\ = 3600 \text{ A}$$

Time Delay

Time delay dipilih 0,1 detik

Tabel 4.12 Data *Setting* Rele 4 *Resetting*

Reley4	
<i>Manufacture</i>	Merlin Gerin Sepam 20
<i>Model</i>	MC Set LF ₁
<i>Curve Type</i>	<i>IEC – Standard Inverse</i>
Ratio	500 : 5
FLA	384,88 A
Isc Min bus 63-LBS-1A	10710 kA
Isc Max bus 63-LBS-1A	14,7 kA

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA} \leq I_{\text{lowset}} \leq 1,4 \times \text{FLA}$$

$$1,05 \times 384,88 \leq I_{\text{lowset}} \leq 1,4 \times 384,88$$

$$404,124 \leq I_{\text{lowset}} \leq 538,83$$

$$\frac{404,124}{500} \text{In} \leq \text{Tap} \leq \frac{538,83}{500} \text{In}$$

$$0,81 \text{In} \leq \text{Tap} \leq 1 \text{In}$$

$$\text{Dipilih Tap } 0,85 \text{In} = (0,85 \times 500) = 425 \text{ A}$$

Time Dial

Dipilih waktu operasi (t) = 0,3 detik

$$t = \left(\frac{0,14}{(M^{0,02} - 1)} \right) \times \frac{T_d}{2,97}$$

$$T_d = \frac{0,3 \times 2,97 \left[\left(\frac{1}{I_{\text{pickup}}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{0,3 \times 2,97 \left[\left(\frac{I_{\text{sc max bus 63-LBS-1A}}{\text{tap} \times \text{CT primary}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{0,3 \times 2,97 \left[\left(\frac{14700}{425} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = 0,47 \text{ dipilih } T_d = 0,5$$

Instantaneous Pickup

$$1,6 \times \text{FLA} \leq I_{\text{highset}} \leq 0,8 \times \text{Isc Min}$$

$$615,8 \leq I_{\text{highset}} \leq 0,8 \times 10710$$

$$615,8 \leq I_{\text{highset}} \leq 8568$$

$$\frac{615,8}{500} \text{In} \leq \text{Tap} \leq \frac{8568}{500} \text{In}$$

$1,23 \text{ In} \leq \text{Tap} \leq 17,13 \text{ In}$
 Dipilih Tap $8 \text{ In} = (8 \times 500)$
 $= 4000 \text{ A}$

Time Delay

Time delay dipilih 0,3 detik

Tabel 4.13 Data Setting Rele 5 Resetting

Reley5	
<i>Manufacture</i>	Merlin Gerin Sepam 20
<i>Model</i>	MC Set LF ₁
<i>Curve Type</i>	IEC - Standard Inverse
Ratio	500 : 5
FLA	384,88 A
Isc Min bus 00-SG-01	11580 kA
Isc Max bus 00-SG-01	17,71 kA

Time Overcurrent Pickup

$1,05 \times \text{FLA} \leq I_{\text{lowset}} \leq 1,4 \times \text{FLA}$
 $1,05 \times 384,88 \leq I_{\text{lowset}} \leq 1,4 \times 384,88$
 $404,124 \leq I_{\text{lowset}} \leq 538,83$
 $\frac{404,124}{500} \text{ In} \leq \text{Tap} \leq \frac{538,83}{500} \text{ In}$
 $0,81 \text{ In} \leq \text{Tap} \leq 1 \text{ In}$
 Dipilih Tap $0,85 \text{ In} = (0,85 \times 500) = 425 \text{ A}$

Time Dial

Dipilih waktu operasi (t) = 0,3 detik

$$t = \left(\frac{0,14}{(M^{0,02} - 1)} \right) \times \frac{T_d}{2,97}$$

$$T_d = \frac{0,3 \times 2,97 \left[\left(\frac{1}{I_{\text{pickup}}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{0,3 \times 2,97 \left[\left(\frac{I_{\text{sc max 00-SG-01}}{\text{tap} \times \text{CT primary}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{0,3 \times 2,97 \left[\left(\frac{17710}{425} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

Td = 0,49 dipilih Td = 0,5

Instantaneous Pickup

$$1,6 \times \text{FLA} \leq I_{\text{highset}} \leq 0,8 \times \text{Isc Min}$$

$$615,8 \leq I_{\text{highset}} \leq 0,8 \times 11580$$

$$615,8 \leq I_{\text{highset}} \leq 9264$$

$$\frac{615,8}{500} \text{ In} \leq \text{Tap} \leq \frac{9264}{500} \text{ In}$$

$$1,23 \text{ In} \leq \text{Tap} \leq 18,52 \text{ In}$$

$$\begin{aligned} \text{Dipilih Tap } 8 \text{ In} &= (8 \times 500) \\ &= 4000 \text{ A} \end{aligned}$$

Time Delay

Time delay dipilih 0,3 detik

Tabel 4.14 Data Setting Rele 11 Resetting

Reley11	
<i>Manufacture</i>	Schneider Electric Sepam Series 10
<i>Model</i>	MC Set LF ₁
<i>Curve Type</i>	IEC - Standard Inverse
<i>Ratio</i>	700 : 5
FLA GTG Solar	621,5 A
Isc Min 00-SG-01	11530 kA
Isc Max 00-SG-01	17,71 kA

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA} \leq I_{\text{lowset}} \leq 1,4 \times \text{FLA}$$

$$1,05 \times 621,5 \leq I_{\text{lowset}} \leq 1,4 \times 621,5$$

$$652,57 \leq I_{\text{lowset}} \leq 870,1$$

$$\frac{652,57}{700} \text{ In} \leq \text{Tap} \leq \frac{870,1}{700} \text{ In}$$

$$0,93 \text{ In} \leq \text{Tap} \leq 1,24 \text{ In}$$

$$\text{Dipilih Tap } 0,98 \text{ In} = (0,98 \times 700) = 686 \text{ A}$$

Time Dial

Dipilih waktu operasi (t) = 0,7 detik

$$t = \left(\frac{0,14}{(M^{0,02} - 1)} \right) \times \frac{T_d}{2,97}$$
$$T_d = \frac{0,7 \times 2,97 \left[\left(\frac{1}{(I_{\text{pickup}})} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{0,7 \times 2,97 \left[\left(\frac{I_{sc \text{ max bus 00-SG-01}}{\text{tap} \times C T \text{ primary}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{0,7 \times 2,97 \left[\left(\frac{17710}{686} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = 0,99 \text{ dipilih } T_d = 1$$

Instantaneous Pickup

$$1,6 \times FLA \leq I_{\text{highset}} \leq 0,8 \times I_{sc \text{ Min}}$$

$$994,4 \leq I_{\text{highset}} \leq 0,8 \times 11530$$

$$994,4 \leq I_{\text{highset}} \leq 9224$$

$$\frac{994,4}{700} I_n \leq \text{Tap} \leq \frac{9224}{700} I_n$$

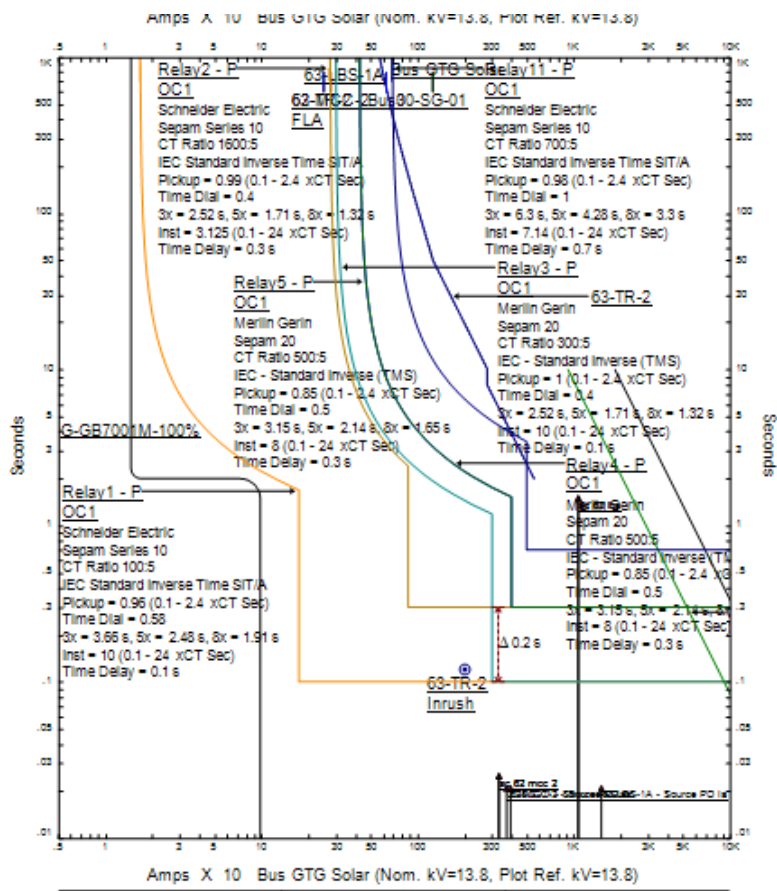
$$1,42 I_n \leq \text{Tap} \leq 13,1 I_n$$

$$\text{Dipilih Tap } 7.14 I_n = (7.14 \times 700) \\ = 5000 \text{ A}$$

Time Delay

Time delay dipilih 0,7 detik

Dengan menggunakan hasil analisa perhitungan yang telah dilakukan, maka kurva arus waktu *resetting* dapat di *plot*. Hasilnya dapat dilihat seperti Gambar 4.4 untuk Time Current Curve dari tipikal 1



Gambar 4.4 Hasil Plot Resetting Rele Gangguan Fasa Tipikal 1

Gambar 4.4 merupakan hasil plot dari setting relay yang diperoleh dari analisa perhitungan. Dari Gambar 4.4 dapat dilihat bahwa ada enam kurva relay yang sudah dikoordinasi dan diplot sesuai dari hasil analisa perhitungan. Hasil plot pada Gambar 4.4 dapat dilihat bahwa settingan relay sudah aman karena arus relay1 sudah tidak memotong kurva arus starting motor G-GB7001M dan kurva relay3 berada di kanan inrush dari trafo 63-TR-2.

4.4.1.3 Analisis Perhitungan Resetting Memperhitungkan Arc Flash Tipikal 1

Analisis perhitungan harus memperhatikan manufaktur rele yang dipakai dan *grading time*. Perhitungan ulang *setting* rele dengan memperhitungkan *arc flash* adalah sebagai berikut :

Tabel 4.15 Data *Setting* Rele 1 *Resetting* Memperhitungkan Arc Flash

Reley1	
<i>Manufacture</i>	Schneider Electric – Sepam Series 10
<i>Model</i>	MC Set LF ₁
<i>Curve Type</i>	IEC - Standard Inverse
Ratio	100 : 5
FLA Motor	87,57 A
LRC Motor	612.99 A
Isc kontribusi Min	20,39 kA
Isc kontribusi Max Motor G-GB7001M	0,44 kA

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA motor} \leq I_{\text{lowset}} \leq 1,4 \times \text{FLA motor}$$

$$1,05 \times 87,57 \leq I_{\text{lowset}} \leq 1,4 \times 87,57$$

$$91,94 \leq I_{\text{lowset}} \leq 122,6$$

$$\frac{91,94}{100} I_n \leq \text{Tap} \leq \frac{122,6}{100} I_n$$

$$0,92 I_n \leq \text{Tap} \leq 1,22 I_n$$

$$\text{Dipilih Tap } 0,92 I_n = (0,92 \times 100) = 92 \text{ A}$$

Time Dial

Dipilih waktu operasi (t) = 0,1 detik

$$t = \left(\frac{0,14}{(M^{0,02} - 1)} \right) \times \frac{T_d}{2,97}$$

$$T_d = \frac{0,1 \times 2,97 \left[\left(\frac{I}{I_{\text{pickup}}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{0,1 \times 2,97 \left[\left(\frac{\text{Isc kontribusi Motor}}{\text{tap} \times \text{CT primary}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{0,1 \times 2,97 \left[\left(\frac{440}{92} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$T_d = 0,06$ dipilih $T_d = 0,5$

Instantaneous Pickup

$I_{start\ motor} \leq I_{highset} \leq 0,8 \times I_{sc\ Min\ Bus\ 3}$

$612,99 \leq I_{highset} \leq 0,8 \times 20390$

$612,99 \leq I_{highset} \leq 6689$

$\frac{612,99}{100} I_n \leq Tap \leq \frac{16312}{100} I_n$

$6,12 I_n \leq Tap \leq 163,12 I_n$

Dipilih Tap $6,12 I_n = (6,12 \times 100)$
 $= 612\ A$

Time Delay

Time delay dipilih 0,1 detik

Tabel 4.16 Data Setting Rele 2 *Resetting* Memperhitungkan Arc Flash

Reley2	
<i>Manufacture</i>	Schneider Electric – Sepam Series 10
<i>Model</i>	MC Set LF ₁
<i>Curve Type</i>	IEC - Standard Inverse
Ratio	1600 : 5
FLA sekunder Trafo 63-TR-2	1443 A
Isc Min	19110 kA
Isc Max bus 62-MCC-2	23,61 kA

Time Overcurrent Pickup

$1,05 \times FLA \leq I_{lowset} \leq 1,4 \times FLA$

$1,05 \times 1443 \leq I_{lowset} \leq 1,4 \times 1443$

$1515,15 \leq I_{lowset} \leq 2020,2$

$\frac{1515,5}{1600} I_n \leq Tap \leq \frac{2020,2}{1600} I_n$

$0,95 I_n \leq Tap \leq 1,26 I_n$

Dipilih Tap $0,95 I_n = (0,95 \times 1600) = 1520\ A$

Time Dial

Dipilih waktu operasi (t) = 0,3 detik

$$t = \left(\frac{0,14}{(M^{0,02}-1)} \right) \times \frac{T_d}{2,97}$$

$$T_d = \frac{0,3 \times 2,97 \left[\left(\frac{I}{I_{pickup}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{0,3 \times 2,97 \left[\left(\frac{I_{sc \max \text{ bus 62-MCC-2}}}{\text{tap x CT primary}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{0,3 \times 2,97 \left[\left(\frac{23610}{1584} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = 0,35 \text{ dipilih } T_d = 0,36$$

Instantaneous Pickup

$$1,6 \times \text{FLA} \leq I_{\text{highset}} \leq 0,8 \times I_{sc \text{ Min}}$$

$$2308,8 \leq I_{\text{highset}} \leq 0,8 \times 19110$$

$$2308,8 \leq I_{\text{highset}} \leq 15288$$

$$\frac{2308,8}{1600} I_n \leq \text{Tap} \leq \frac{15288}{1600} I_n$$

$$1,44 I_n \leq \text{Tap} \leq 9,55 I_n$$

$$\text{Dipilih Tap } 1.45 I_n = (1.45 \times 1600) \\ = 2320 \text{ A}$$

Time Delay

Time delay dipilih 0,3 detik

Tabel 4.17 Data Setting Rele 3 Resetting Memperhitungkan Arc Flash

Reley3	
<i>Manufacture</i>	Merlin Gerin Sepam 20
<i>Model</i>	MC Set LF ₁
<i>Curve Type</i>	IEC – Standard Inverse
<i>Ratio</i>	300 : 5
FLA Primer Trafo 63-TR-2	251 A
Isc Min bus 63-LBS-1A	10710 kA
Isc Max bus 63-LBS-1A	14,7 kA

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA} \leq I_{\text{lowset}} \leq 1,4 \times \text{FLA}$$

$$1,05 \times 251 \leq I_{\text{lowset}} \leq 1,4 \times 251$$

$$263,55 \leq I_{\text{lowset}} \leq 351,4$$

$$\frac{263,55}{300} I_n \leq \text{Tap} \leq \frac{351,4}{300} I_n$$

$$0,88 \text{ In} \leq \text{Tap} \leq 1,17 \text{ In}$$

$$\text{Dipilih Tap } 0,88 \text{ In} = (0,88 \times 300) = 264 \text{ A}$$

Time Dial

Dipilih waktu operasi (t) = 0,1 detik karena memungkinkan untuk koreset karena $I_{sc} \text{ max bus sekunder} < I_{set} < 0,8 I_{sc} \text{ min bus primer}$

$$t = \left(\frac{0,14}{(M^{0,02} - 1)} \right) \times \frac{T_d}{2,97}$$

$$T_d = \frac{0,1 \times 2,97 \left[\left(\frac{1}{I_{pickup}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{0,1 \times 2,97 \left[\left(\frac{I_{sc} \text{ max bus 63-LBS-1A}}{\text{tap} \times C_T \text{ primary}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{0,1 \times 2,97 \left[\left(\frac{14700}{264} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = 0,17 \text{ dipilih } T_d = 0,36$$

Instantaneous Pickup

$$1,6 \times \text{FLA} \leq I_{\text{highset}} \leq 0,8 \times I_{sc} \text{ Min}$$

$$263,55 \leq I_{\text{highset}} \leq 0,8 \times 10710$$

$$263,55 \leq I_{\text{highset}} \leq 8568$$

$$\frac{263,55}{300} \text{ In} \leq \text{Tap} \leq \frac{8568}{300} \text{ In}$$

$$1,33 \text{ In} \leq \text{Tap} \leq 28,56 \text{ In}$$

$$\begin{aligned} \text{Dipilih Tap } 7,5 \text{ In} &= (7,5 \times 300) \\ &= 2250 \text{ A} \end{aligned}$$

Time Delay

Time delay dipilih 0,1 detik

Tabel 4.18 Data Setting Rele 4 Resetting Memperhitungkan Arc Flash

Reley4	
<i>Manufacture</i>	Merlin Gerin Sepam 20
<i>Model</i>	MC Set LF ₁
<i>Curve Type</i>	IEC – Standard Inverse
Ratio	500 : 5
FLA	384,88 A
Isc Min bus 63-LBS-1A	10710 kA
Isc Max bus 63-LBS-1A	14,7 kA

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA} \leq I_{\text{lowset}} \leq 1,4 \times \text{FLA}$$

$$1,05 \times 384,88 \leq I_{\text{lowset}} \leq 1,4 \times 384,88$$

$$404,124 \leq I_{\text{lowset}} \leq 538,83$$

$$\frac{404,124}{500} \text{ In} \leq \text{Tap} \leq \frac{538,83}{500} \text{ In}$$

$$0,81 \text{ In} \leq \text{Tap} \leq 1 \text{ In}$$

$$\text{Dipilih Tap } 0,81 \text{ In} = (0,81 \times 500) = 405 \text{ A}$$

Time Dial

Dipilih waktu operasi (t) = 0,3 detik

$$t = \left(\frac{0,14}{(M^{0,02} - 1)} \right) \times \frac{T_d}{2,97}$$

$$T_d = \frac{0,3 \times 2,97 \left[\left(\frac{I}{I_{\text{pickup}}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{0,3 \times 2,97 \left[\left(\frac{I_{\text{sc max bus 63-LBS-1A}}{\text{tap} \times \text{CT primary}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{0,3 \times 2,97 \left[\left(\frac{14700}{405} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = 0,47 \text{ dipilih } T_d = 0,5$$

Instantaneous Pickup

$$1,6 \times \text{FLA} \leq I_{\text{highset}} \leq 0,8 \times I_{\text{sc Min}}$$

$$615,8 \leq I_{\text{highset}} \leq 0,8 \times 10710$$

$$615,8 \leq I_{\text{highset}} \leq 8568$$

$$\frac{615,8}{500} \text{ In} \leq \text{Tap} \leq \frac{8568}{500} \text{ In}$$

$$1,23 \text{ In} \leq \text{Tap} \leq 17,13 \text{ In}$$

$$\text{Dipilih Tap } 4,7 \text{ In} = (4,7 \times 500) \\ = 2350 \text{ A}$$

Time Delay

Time delay dipilih 0,3 detik

Tabel 4.19 Data *Setting* Rele 5 *Resetting* Memperhitungkan *Arc Flash*

Reley5	
<i>Manufacture</i>	Merlin Gerin Sepam 20
<i>Model</i>	MC Set LF ₁
<i>Curve Type</i>	<i>IEC – Standard Inverse</i>
Ratio	500 : 5
FLA	384,88 A
Isc Min bus 00-SG-01	11580 kA
Isc Max bus 00-SG-01	17,71 kA

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times FLA \leq I_{lowset} \leq 1,4 \times FLA$$

$$1,05 \times 384,88 \leq I_{lowset} \leq 1,4 \times 384,88$$

$$404,124 \leq I_{lowset} \leq 538,83$$

$$\frac{404,124}{500} In \leq Tap \leq \frac{538,83}{500} In$$

$$0,81 In \leq Tap \leq 1 In$$

$$\text{Dipilih Tap } 0,81 In = (0,81 \times 500) = 405 A$$

Time Dial

Dipilih waktu operasi (t) = 0,3 detik

$$t = \left(\frac{0,14}{(M^{0,02} - 1)} \right) \times \frac{Td}{2,97}$$

$$Td = \frac{0,3 \times 2,97 \left[\left(\frac{1}{I_{pickup}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$Td = \frac{0,3 \times 2,97 \left[\left(\frac{I_{sc \max 00-SG-01}}{tap \times CT \text{ primary}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$Td = \frac{0,3 \times 2,97 \left[\left(\frac{17710}{405} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$Td = 0,49 \text{ dipilih } Td = 0,5$$

Instantaneous Pickup

$$1,6 \times FLA \leq I_{highset} \leq 0,8 \times I_{sc \min}$$

$$615,8 \leq I_{highset} \leq 0,8 \times 11580$$

$$615,8 \leq I_{highset} \leq 9264$$

$$\frac{615,8}{500} In \leq Tap \leq \frac{9264}{500} In$$

$$1,23 I_n \leq \text{Tap} \leq 18,52 I_n$$

$$\text{Dipilih Tap } 4,7 I_n = (4,7 \times 500)$$

$$= 2350 \text{ A}$$

Time Delay

Time delay dipilih 0,3 detik

Tabel 4.20 Data Setting Rele 11 *Resetting* Memperhitungkan Arc Flash

Reley11	
<i>Manufacture</i>	Schneider Electric Sepam Series 10
<i>Model</i>	MC Set LF ₁
<i>Curve Type</i>	<i>IEC Standard Inverse</i>
<i>Ratio</i>	700 : 5
FLA GTG Solar	621,5 A
Isc Min 00-SG-01	11530 kA
Isc Max 00-SG-01	17,71 kA

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA} \leq I_{\text{lowset}} \leq 1,4 \times \text{FLA}$$

$$1,05 \times 621,5 \leq I_{\text{lowset}} \leq 1,4 \times 621,5$$

$$652,57 \leq I_{\text{lowset}} \leq 870,1$$

$$\frac{652,57}{700} I_n \leq \text{Tap} \leq \frac{870,1}{700} I_n$$

$$0,93 I_n \leq \text{Tap} \leq 1,24 I_n$$

$$\text{Dipilih Tap } 0,93 I_n = (0,93 \times 700) = 651 \text{ A}$$

Time Dial

Dipilih waktu operasi (t) = 0,7 detik

$$t = \left(\frac{0,14}{(M^{0,02} - 1)} \right) \times \frac{T_d}{2,97}$$

$$0,7 \times 2,97 \left[\left(\frac{1}{I_{\text{pickup}}} \right)^{0,02} - 1 \right]$$

$$T_d = \frac{0,14}{0,7 \times 2,97 \left[\left(\frac{I_{\text{sc max bus 00-SG-01}}{\text{tap} \times \text{CT primary}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$T_d = \frac{0,14}{0,7 \times 2,97 \left[\left(\frac{17710}{651} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$T_d = 0,99 \text{ dipilih } T_d = 1$$

Instantaneous Pickup

$$1,6 \times I_{FLA} \leq I_{highset} \leq 0,8 \times I_{sc} \text{ Min}$$

$$994,4 \leq I_{highset} \leq 0,8 \times 11530$$

$$994,4 \leq I_{highset} \leq 9224$$

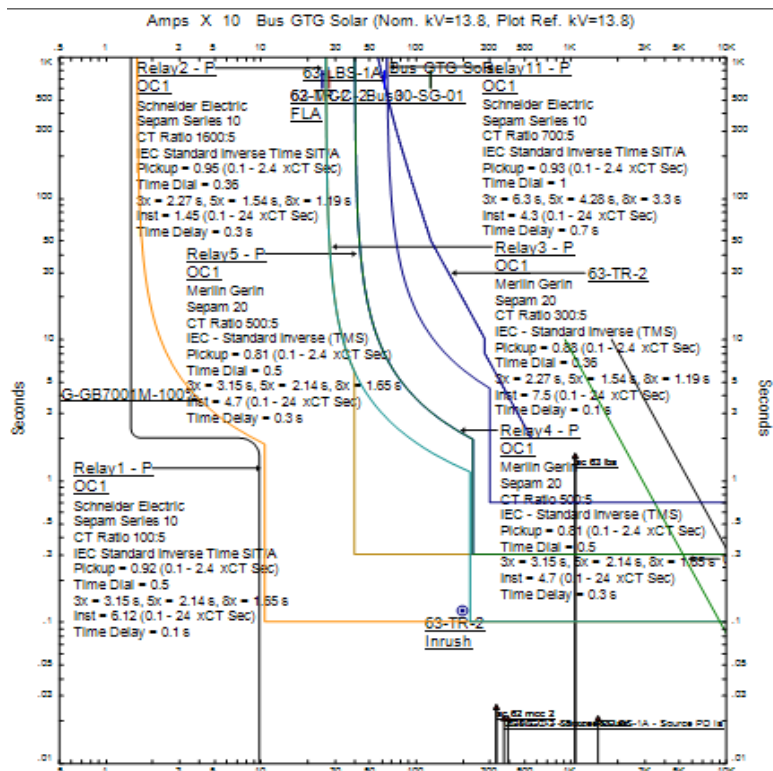
$$\frac{994,4}{700} I_n \leq \text{Tap} \leq \frac{9224}{700} I_n$$

$$1,42 I_n \leq \text{Tap} \leq 13,1 I_n$$

$$\begin{aligned} \text{Dipilih Tap } 4,3 I_n &= (4,3 \times 700) \\ &= 3010 \text{ A} \end{aligned}$$

Time Delay

Time delay dipilih 0,7 detik

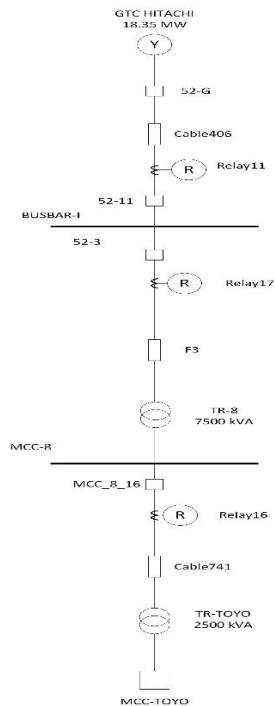


Gambar 4.5 Hasil Plot Resetting Rele Gangguan Fasa Tipikal 1
Memperhitungkan Arc Flash

Gambar 4.5 merupakan hasil plot resetting rele gangguan fasa tipikal 1 dengan memperhitungkan arc flash, disana dapat kita lihat untuk pickup relenya adalah pickup minimum arus yang diizinkan. Hal ini bertujuan untuk mengurangi insiden energi yang akan terjadi.

4.4.2 Koordinasi Rele Arus Lebih Tipikal 2

Tipikal 2 adalah koordinasi pengaman dari MCC-TOYO sampai dengan generartor GTG HITACHI. Tipikal ini terdiri dua level tegangan, yaitu 13,8 kV dan 2,4 kV. Pada tipikal ini terdapat 3 relej pengaman yang dikoordinasikan yaitu relej16, relej17 dan relej21. Serta satu trafo *step down* 13,8/2,4 kV. Koordinasi rele arus lebih tipikal 2 pada kondisi eksisting dipresentasikan melalui Gambar 4.6 dibawah ini :



Gambar 4.6 Single Line Diagram Tipikal 2

4.4.2.1 Pickup Reley Eksisting Tipikal 2

Berikut adalah setting reley waktu eksisting untuk tipikal 2 :

Tabel 4.21 Data Setting Rele 16 Eksisting

Reley16	
<i>Manufacture</i>	Schneider Electric Sepam Series 10
<i>Model</i>	MC Set LF ₁
<i>Curve Type</i>	<i>Standard Inverse</i>
Ratio	1000 : 5
FLA TR-TOYO	601,4 A
Isc Min	17,79 kA
Isc Max	31,31 kA

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA} \leq I_{\text{lowset}} \leq 1,4 \times \text{FLA}$$

$$1,05 \times 601,4 \leq I_{\text{lowset}} \leq 1,4 \times 601,4$$

$$631,47 \leq I_{\text{lowset}} \leq 841,96$$

$$\frac{631,47}{1000} \text{ In} \leq \text{Tap} \leq \frac{841,96}{1000} \text{ In}$$

$$0,63 \text{ In} \leq \text{Tap} \leq 0,84 \text{ In}$$

$$\text{Dipilih Tap } 0,66 \text{ In} = (0,66 \times 1000) = 660 \text{ A}$$

Time Dial

Dipilih waktu operasi (t) = 0,1 detik

$$t = \left(\frac{0,14}{(M^{0,02} - 1)} \right) \times \frac{T_d}{2,97}$$

$$T_d = \frac{0,1 \times 2,97 \left[\left(\frac{1}{I_{\text{pickup}}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{0,1 \times 2,97 \left[\left(\frac{I_{\text{sc max}}}{\text{tap} \times \text{CT primary}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{0,1 \times 2,97 \left[\left(\frac{31310}{660} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = 0,02 \text{ dipilih } T_d = 0,2$$

Instantaneous Pickup

$$1,6 \times \text{FLA} \leq I_{\text{highset}} \leq 0,8 \times \text{Isc Min}$$

$$962,24 \leq I_{\text{highset}} \leq 0,8 \times 17790$$

$$962,24 \leq I_{\text{highset}} \leq 14232$$

$$\frac{962,24}{1000} \text{ In} \leq \text{Tap} \leq \frac{14232}{1000} \text{ In}$$

$$0,96 \text{ In} \leq \text{Tap} \leq 14,2 \text{ In}$$

Dipilih Tap 4 In = (4 x 1000)
= 4000 A

Time Delay

Time delay dipilih 0,1 detik

Tabel 4.22 Data Setting Rele 17 Eksisting

Reley17	
<i>Manufacture</i>	Schneider Electric Sepam Series 10
<i>Model</i>	MC Set LF ₁
<i>Curve Type</i>	<i>Standard Inverse</i>
Ratio	400 : 5
FLA TR-TOYO	313,8 A
Isc Min	8,89 kA
Isc Max	16,51 kA

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA} \leq I_{\text{lowset}} \leq 1,4 \times \text{FLA}$$

$$1,05 \times 313,8 \leq I_{\text{lowset}} \leq 1,4 \times 313,8$$

$$329,49 \leq I_{\text{lowset}} \leq 439,32$$

$$\frac{329,49}{400} \text{ In} \leq \text{Tap} \leq \frac{439,32}{400} \text{ In}$$

$$0,82 \text{ In} \leq \text{Tap} \leq 1,09 \text{ In}$$

Dipilih Tap 0,86 In = (0,86 x 400) = 344 A

Time Dial

Dipilih waktu operasi (t) = 0,3 detik

$$t = \left(\frac{0,14}{(M^{0,02} - 1)} \right) \times \frac{T_d}{2,97}$$

$$T_d = \frac{0,3 \times 2,97 \left[\left(\frac{1}{I_{\text{pickup}}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{0,3 \times 2,97 \left[\left(\frac{I_{\text{sc max}}}{\text{tap} \times \text{CT primary}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{0,3 \times 2,97 \left[\left(\frac{16510}{344} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$T_d = 0,07$ dipilih $T_d = 0,1$

Instantaneous Pickup

$$1,6 \times FLA \leq I_{\text{highset}} \leq 0,8 \times I_{\text{sc Min}}$$

$$1,6 \times 313,8 \leq I_{\text{highset}} \leq 0,8 \times 8890$$

$$502,08 \leq I_{\text{highset}} \leq 7112$$

$$\frac{502,08}{400} I_n \leq \text{Tap} \leq \frac{7112}{400} I_n$$

$$1,255 I_n \leq \text{Tap} \leq 17,78 I_n$$

Dipilih Tap 5 $I_n = (5 \times 400)$
 $= 2000 \text{ A}$

Time Delay

Time delay dipilih 0,3 detik

Tabel 4.23 Data Setting Rele 21 Eksisting

Reley21	
<i>Manufacture</i>	Schneider Electric Sepam Series 10
<i>Model</i>	MC Set LF ₁
<i>Curve Type</i>	<i>Standard Inverse</i>
Ratio	1000 : 5
FLA GTG HITACHI	903,2 A
Isc Min BUSBAR 1	9,04 kA
Isc Max BUSBAR 1	16,49 kA

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times FLA \leq I_{\text{lowset}} \leq 1,4 \times FLA$$

$$1,05 \times 903,2 \leq I_{\text{lowset}} \leq 1,4 \times 903,2$$

$$948,36 \leq I_{\text{lowset}} \leq 1264,48$$

$$\frac{948,36}{1000} I_n \leq \text{Tap} \leq \frac{1264,48}{1000} I_n$$

$$0,95 I_n \leq \text{Tap} \leq 1,26 I_n$$

Dipilih Tap 0,99 $I_n = (0,99 \times 1000) = 990 \text{ A}$

Time Dial

Dipilih waktu operasi (t) = 0,7 detik

$$t = \left(\frac{0,14}{(M^{0,02}-1)} \right) \times \frac{Td}{2,97}$$

$$Td = \frac{0,7 \times 2,97 \left[\left(\frac{I}{I_{pickup}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$Td = \frac{0,7 \times 2,97 \left[\left(\frac{I_{sc \max}}{I_{tap \times CT \ primary}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$Td = \frac{0,7 \times 2,97 \left[\left(\frac{16490}{990} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$Td = 0,12 \text{ dipilih } Td = 0,6$$

Instantaneous Pickup

$$1,6 \times FLA \leq I_{highset} \leq 0,8 \times I_{sc \ Min}$$

$$1,6 \times 903,2 \leq I_{highset} \leq 0,8 \times 9040$$

$$1445,12 \leq I_{highset} \leq 7232$$

$$\frac{1445,12}{1000} In \leq Tap \leq \frac{7232}{1000} In$$

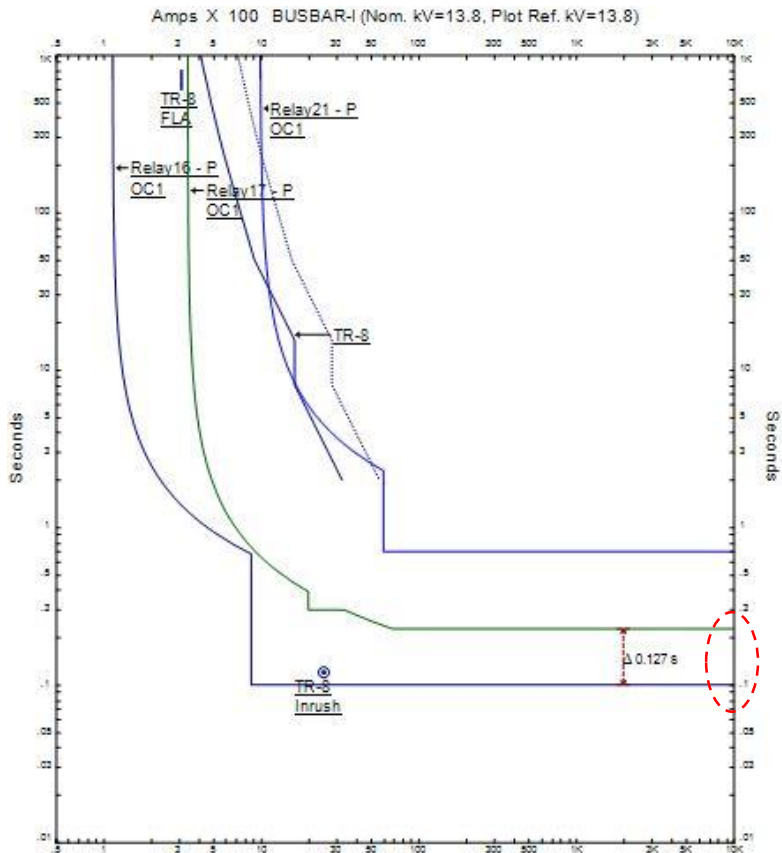
$$1,44 In \leq Tap \leq 7,23 In$$

$$\text{Dipilih Tap } 6 In = (6 \times 1000) \\ = 6000 A$$

Time Delay

Time delay dipilih 0,7 detik

Data eksisting koordinasi proteksi tipikal 2 ini *diplot* menggunakan *software* ETAP. Gambar eksisting koordinasi proteksi tipikal 2 dapat dilihat pada Gambar 4.7 dibawah ini



Gambar 4.7 Hasil Plot Eksisting Rele Gangguan Fasa Tipikal 2

Hasil analisa, *grading time* antara reley16 dan reley17 pada eksisting tidak sesuai standar IEEE 242 0,2-0,4 detik. Dari Gambar 4.6 dapat dilihat hasil *grading time*-nya hanya 0,127 detik.

4.4.2.2 Analisis Perhitungan Resetting Tipikal 2

Analisis perhitungan harus memperhatikan manufaktur rele yang dipakai dan *grading time*. Perhitungan ulang *setting* rele tersebut adalah sebagai berikut :

Tabel 4.24 Data *Setting* Rele 16 *Resetting*

Reley16	
<i>Manufacture</i>	Schneider Electric Sepam Series 10
<i>Model</i>	MC Set LF ₁
<i>Curve Type</i>	<i>IEC - Standard Inverse</i>
Ratio	1000 : 5
FLA TR-TOYO	601,4 A
Isc Min	17,79 kA
Isc Max	31,31 kA

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA} \leq I_{\text{lowset}} \leq 1,4 \times \text{FLA}$$

$$1,05 \times 601,4 \leq I_{\text{lowset}} \leq 1,4 \times 601,4$$

$$631,47 \leq I_{\text{lowset}} \leq 841,96$$

$$\frac{631,47}{1000} \text{ In} \leq \text{Tap} \leq \frac{841,96}{1000} \text{ In}$$

$$0,63 \text{ In} \leq \text{Tap} \leq 0,84 \text{ In}$$

$$\text{Dipilih Tap } 0,66 \text{ In} = (0,66 \times 1000) = 660 \text{ A}$$

Time Dial

Dipilih waktu operasi (t) = 0,1 detik

$$t = \left(\frac{0,14}{(M^{0,02} - 1)} \right) \times \frac{T_d}{2,97}$$

$$0,1 \times 2,97 \left[\left(\frac{1}{I_{\text{pickup}}} \right)^{0,02} - 1 \right]$$

$$T_d = \frac{0,14}{0,1 \times 2,97 \left[\left(\frac{I_{\text{sc max}}}{\text{tap} \times \text{CT primary}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$T_d = \frac{0,1 \times 2,97 \left[\left(\frac{31310}{660} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = 0,17 \text{ dipilih } T_d = 0,2$$

Instantaneous Pickup

$$1,6 \times \text{FLA} \leq I_{\text{highset}} \leq 0,8 \times \text{Isc Min}$$

$$1,6 \times 601,4 \leq I_{\text{highset}} \leq 0,8 \times 17790$$

$$962,24 \leq I_{\text{highset}} \leq 14232$$

$$\frac{962,24}{1000} \text{ In} \leq \text{Tap} \leq \frac{14232}{1000} \text{ In}$$

$$0,96 \text{ In} \leq \text{Tap} \leq 14,2 \text{ In}$$

$$\begin{aligned} \text{Dipilih Tap } 6 \text{ In} &= (6 \times 1000) \\ &= 6000 \text{ A} \end{aligned}$$

Time Delay

Time delay dipilih 0,1 detik

Tabel 4.25 Data Setting Rele 17 Resetting

Reley17	
<i>Manufacture</i>	Schneider Electric Sepam Series 10
<i>Model</i>	MC Set LF ₁
<i>Curve Type</i>	IEC - Standard Inverse
<i>Ratio</i>	400 : 5
<i>FLA TR-TOYO</i>	313,8 A
<i>Isc Min</i>	8,89 kA
<i>Isc Max</i>	16,51 kA

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA} \leq I_{\text{lowset}} \leq 1,4 \times \text{FLA}$$

$$1,05 \times 313,8 \leq I_{\text{lowset}} \leq 1,4 \times 313,8$$

$$329,49 \leq I_{\text{lowset}} \leq 439,32$$

$$\frac{329,49}{400} \text{ In} \leq \text{Tap} \leq \frac{439,32}{400} \text{ In}$$

$$0,82 \text{ In} \leq \text{Tap} \leq 1,09 \text{ In}$$

$$\text{Dipilih Tap } 0,86 \text{ In} = (0,86 \times 400) = 344 \text{ A}$$

Time Dial

Dipilih waktu operasi (t) = 0,1 detik

$$t = \left(\frac{0,14}{(M^{0,02} - 1)} \right) \times \frac{T_d}{2,97}$$
$$T_d = \frac{0,1 \times 2,97 \left[\left(\frac{1}{(I_{\text{pickup}})^{0,02}} - 1 \right) \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{0,1 \times 2,97 \left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I_{\text{tap}} \times CT_{\text{primary}}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{0,1 \times 2,97 \left[\left(\frac{16510}{344} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$T_d = 0,17$ dipilih $T_d = 0,17$

Instantaneous Pickup

$$1,6 \times FLA \leq I_{\text{highset}} \leq 0,8 \times I_{sc \text{ Min}}$$

$$1,6 \times 313,8 \leq I_{\text{highset}} \leq 0,8 \times 8890$$

$$1882,8 \leq I_{\text{highset}} \leq 7112$$

$$\frac{502,08}{400} I_n \leq \text{Tap} \leq \frac{7112}{400} I_n$$

$$1,255 I_n \leq \text{Tap} \leq 17,78 I_n$$

Dipilih Tap 14 $I_n = (14 \times 400)$
 $= 5600 \text{ A}$

Time Delay

Time delay dipilih 0,1 detik

Tabel 4.26 Data Setting Rele 21 *Resetting*

Reley21	
<i>Manufacture</i>	Schneider Electric Sepam Series 10
<i>Model</i>	MC Set LF ₁
<i>Curve Type</i>	IEC - Standard Inverse
<i>Ratio</i>	1000 : 5
FLA GTG HITACHI	903,2 A
Isc Min BUSBAR 1	9,04 kA
Isc Max BUSBAR 1	16,49 kA

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times FLA \leq I_{\text{lowset}} \leq 1,4 \times FLA$$

$$1,05 \times 903,2 \leq I_{\text{lowset}} \leq 1,4 \times 903,2$$

$$948,36 \leq I_{\text{lowset}} \leq 1264,48$$

$$\frac{948,36}{1000} I_n \leq \text{Tap} \leq \frac{1264,48}{1000} I_n$$

$$0,95 I_n \leq \text{Tap} \leq 1,26 I_n$$

Dipilih Tap 0,99 $I_n = (0,99 \times 1000) = 990 \text{ A}$

Time Dial

Dipilih waktu operasi (t) = 0,7 detik

$$t = \left(\frac{0,14}{(M^{0,02} - 1)} \right) \times \frac{T_d}{2,97}$$

$$T_d = \frac{0,7 \times 2,97 \left[\left(\frac{1}{(I_{pickup})} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{0,7 \times 2,97 \left[\left(\frac{I_{sc \max}}{(\text{tap} \times CT \text{ primary})} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{0,7 \times 2,97 \left[\left(\frac{16490}{990} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

Td = 0,12 dipilih Td = 0,2

Instantaneous Pickup

$$1,6 \times FLA \leq I_{highset} \leq 0,8 \times I_{sc \text{ Min}}$$

$$1,6 \times 903,2 \leq I_{highset} \leq 0,8 \times 9040$$

$$5419,2 \leq I_{highset} \leq 7232$$

$$\frac{1445,12}{1000} I_n \leq \text{Tap} \leq \frac{7232}{1000} I_n$$

$$1,44 I_n \leq \text{Tap} \leq 7,23 I_n$$

$$\begin{aligned} \text{Dipilih Tap } 6 I_n &= (6 \times 1000) \\ &= 6000 \text{ A} \end{aligned}$$

Time Delay

Time delay dipilih 0,7 detik

4.4.2.3 Analisis Perhitungan Resetting Memperhitungkan Arc Flash Tipikal 2

Analisis perhitungan harus memperhatikan manufaktur rele yang dipakai dan *grading time*. Perhitungan ulang *setting* rele dengan memperhitungkan *arc flash* adalah sebagai berikut :

Tabel 4.27 Data *Setting* Rele 16 *Resetting* Memperhitungkan Arc Flash

Reley16	
<i>Manufacture</i>	Schneider Electric Sepam Series 10
<i>Model</i>	MC Set LF ₁
<i>Curve Type</i>	IEC - Standard Inverse
Ratio	1000 : 5
FLA TR-TOYO	601,4 A
Isc Min	17,79 kA
Isc Max	31,31 kA

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times FLA \leq I_{lowset} \leq 1,4 \times FLA$$

$$1,05 \times 601,4 \leq I_{lowset} \leq 1,4 \times 601,4$$

$$631,47 \leq I_{lowset} \leq 841,96$$

$$\frac{631,47}{1000} In \leq Tap \leq \frac{841,96}{1000} In$$

$$0,63 In \leq Tap \leq 0,84 In$$

$$\text{Dipilih Tap } 0,63 In = (0,63 \times 1000) = 630 \text{ A}$$

Time Dial

Dipilih waktu operasi (t) = 0,1 detik

$$t = \left(\frac{0,14}{(M^{0,02} - 1)} \right) \times \frac{Td}{2,97}$$

$$Td = \frac{0,1 \times 2,97 \left[\left(\frac{1}{I_{pickup}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$Td = \frac{0,1 \times 2,97 \left[\left(\frac{Isc \text{ max}}{Tap \times CT \text{ primary}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$Td = \frac{0,1 \times 2,97 \left[\left(\frac{31310}{630} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$Td = 0,17 \text{ dipilih } Td = 0,17$$

Instantaneous Pickup

$$1,6 \times \text{FLA} \leq I_{\text{highset}} \leq 0,8 \times \text{Isc Min}$$

$$1,6 \times 601,4 \leq I_{\text{highset}} \leq 0,8 \times 17790$$

$$962,24 \leq I_{\text{highset}} \leq 14232$$

$$\frac{962,24}{1000} \text{ In} \leq \text{Tap} \leq \frac{14232}{1000} \text{ In}$$

$$0,96 \text{ In} \leq \text{Tap} \leq 14,2 \text{ In}$$

$$\text{Dipilih Tap } 5,5 \text{ In} = (5,5 \times 1000)$$

$$= 5500 \text{ A}$$

Time Delay

Time delay dipilih 0,1 detik

Tabel 4.28 Data Setting Rele 17 *Resetting* Memperhitungkan Arc Flash

Reley17	
<i>Manufacture</i>	Schneider Electric Sepam Series 10
<i>Model</i>	MC Set LF ₁
<i>Curve Type</i>	<i>Standard Inverse</i>
Ratio	400 : 5
FLA TR-TOYO	313,8 A
Isc Min	8,89 kA
Isc Max	16,51 kA

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA} \leq I_{\text{lowset}} \leq 1,4 \times \text{FLA}$$

$$1,05 \times 313,8 \leq I_{\text{lowset}} \leq 1,4 \times 313,8$$

$$329,49 \leq I_{\text{lowset}} \leq 439,32$$

$$\frac{329,49}{400} \text{ In} \leq \text{Tap} \leq \frac{439,32}{400} \text{ In}$$

$$0,82 \text{ In} \leq \text{Tap} \leq 1,09 \text{ In}$$

$$\text{Dipilih Tap } 0,82 \text{ In} = (0,82 \times 400) = 328 \text{ A}$$

Time Dial

Dipilih waktu operasi (t) = 0,1 detik

$$t = \left(\frac{0,14}{(M^{0,02} - 1)} \right) \times \frac{T_d}{2,97}$$

$$T_d = \frac{0,1 \times 2,97 \left[\left(\frac{1}{(1.pickup)} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{0,1 \times 2,97 \left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{(tap \times CT \text{ primary})} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{0,1 \times 2,97 \left[\left(\frac{16510}{328} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$T_d = 0,17$ dipilih $T_d = 0,17$

Instantaneous Pickup

$$1,6 \times FLA \leq I_{highset} \leq 0,8 \times I_{sc \text{ Min}}$$

$$1,6 \times 313,8 \leq I_{highset} \leq 0,8 \times 8890$$

$$1882,8 \leq I_{highset} \leq 7112$$

$$\frac{502,08}{400} I_n \leq Tap \leq \frac{7112}{400} I_n$$

$$1,255 I_n \leq Tap \leq 17,78 I_n$$

$$\begin{aligned} \text{Dipilih Tap } 7 I_n &= (7 \times 400) \\ &= 2800 \text{ A} \end{aligned}$$

Time Delay

Time delay dipilih 0,1 detik

Tabel 4.29 Data Setting Rele 21 *Resetting* Memperhitungkan Arc Flash

Reley21	
<i>Manufacture</i>	Schneider Electric Sepam Series 10
<i>Model</i>	MC Set LF ₁
<i>Curve Type</i>	<i>Standard Inverse</i>
Ratio	1000 : 5
FLA GTG HITACHI	903,2 A
Isc Min BUSBAR 1	9,04 kA
Isc Max BUSBAR 1	16,49 kA

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times FLA \leq I_{lowset} \leq 1,4 \times FLA$$

$$1,05 \times 903,2 \leq I_{lowset} \leq 1,4 \times 903,2$$

$$948,36 \leq I_{lowset} \leq 1264,48$$

$$\frac{948,36}{1000} I_n \leq Tap \leq \frac{1264,48}{1000} I_n$$

$$0,95 \text{ In} \leq \text{Tap} \leq 1,26 \text{ In}$$

$$\text{Dipilih Tap } 0,95 \text{ In} = (0,95 \times 1000) = 950 \text{ A}$$

Time Dial

Dipilih waktu operasi (t) = 0,7 detik

$$t = \left(\frac{0,14}{(M^{0,02}-1)} \right) \times \frac{T_d}{2,97}$$

$$T_d = \frac{0,7 \times 2,97 \left[\left(\frac{I}{I_{pickup}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{0,7 \times 2,97 \left[\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{(\text{tap} \times CT \text{ primary})} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{0,7 \times 2,97 \left[\left(\frac{16490}{990} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = 0,12 \text{ dipilih } T_d = 0,2$$

Instantaneous Pickup

$$1,6 \times \text{FLA} \leq I_{\text{highset}} \leq 0,8 \times I_{sc \text{ Min}}$$

$$1,6 \times 903,2 \leq I_{\text{highset}} \leq 0,8 \times 9040$$

$$5419,2 \leq I_{\text{highset}} \leq 7232$$

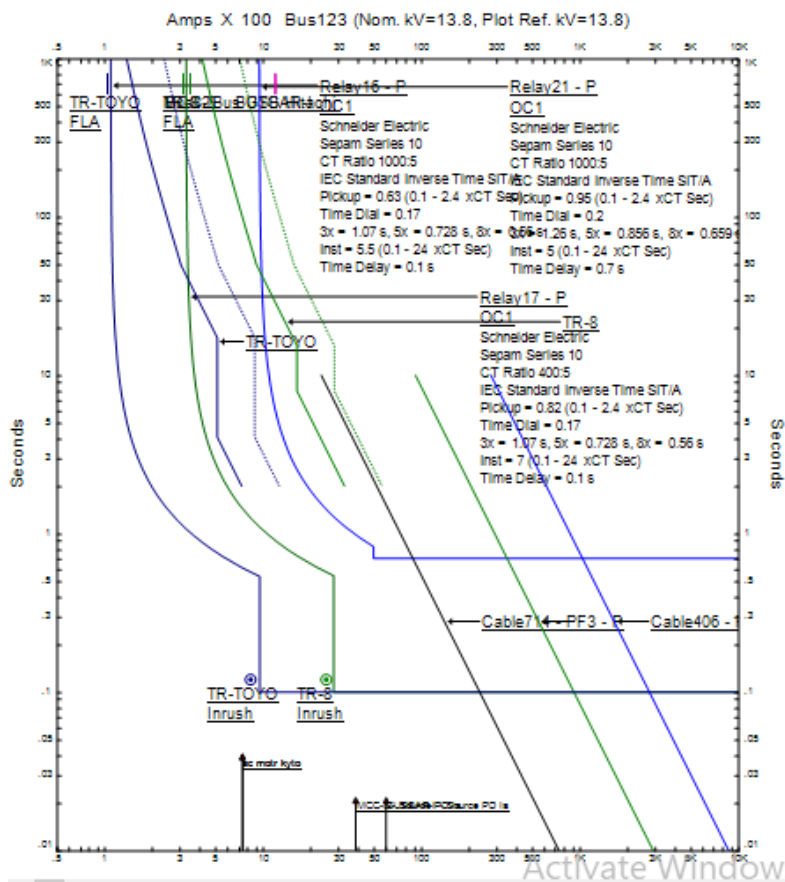
$$\frac{1445,12}{1000} \text{ In} \leq \text{Tap} \leq \frac{7232}{1000} \text{ In}$$

$$1,44 \text{ In} \leq \text{Tap} \leq 7,23 \text{ In}$$

$$\begin{aligned} \text{Dipilih Tap } 5 \text{ In} &= (5 \times 1000) \\ &= 5000 \text{ A} \end{aligned}$$

Time Delay

Time delay dipilih 0,7 detik



Gambar 4.9 Hasil Plot Resetting Rele Gangguan Fasa Tipikal 2 dengan Memperhitungkan Arc Flash

Gambar 4.9 merupakan hasil plot resetting rele gangguan fasa tipikal 2 dengan memperhitungkan arc flash, disana dapat kita lihat untuk pickup relenya adalah nilai minimum arus yang diperbolehkan. Hal ini bertujuan untuk mengurangi insiden energi yang akan terjadi.

4.5 Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan ke Tanah Tipikal

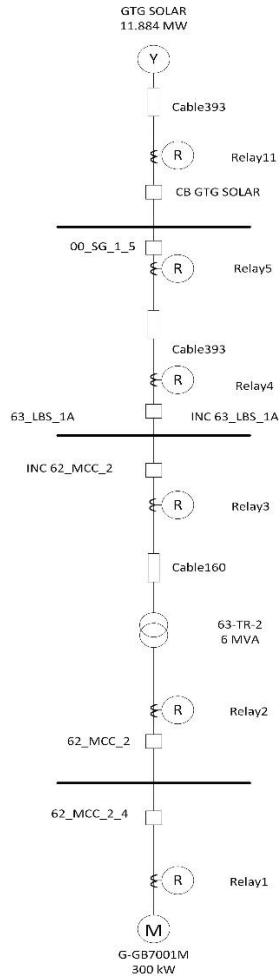
1

Rele arus lebih gangguan tanah berfungsi untuk melindungi saat terjadi gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah. Koordinasi rele arus lebih gangguan ke tanah ini sangat dipengaruhi oleh pemasangan NGR karena arus hubung singkat ketanah terbesar adalah sama dengan NGR yang dipasang. Berikut adalah data trafo pada tipikal untuk tegangan dan pentanahan.

Tabel 4.30 Tabel Tegangan dan Pentanahan Peralatan Transformator

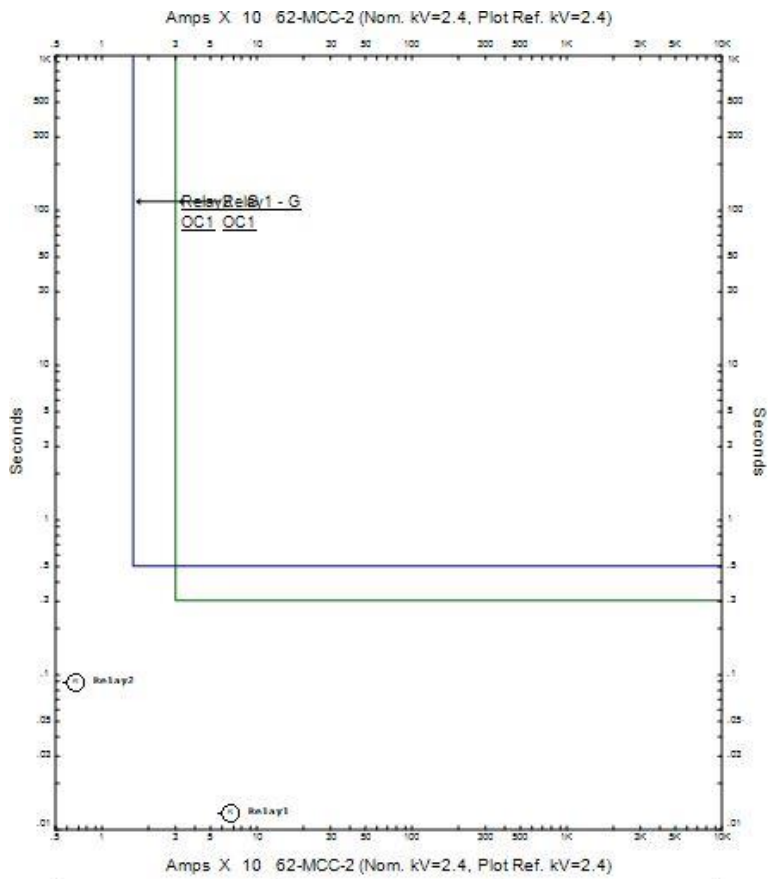
No	Peralatan	Rating Tegangan	Hubungan Belitan	Pentanahan
1	TR-PLN	150/13,8 kV	Bintang-Bintang	Open
2	63-TR-2	13,8/2,4 kV	Delta-Bintang	NGR 100 A
3	TR-8	13,8/2,4 kV	Delta-Bintang	Solid
4	TR-TOYO	2,4/0,48 kV	Delta-Bintang	Solid

Koordinasi rele arus lebih gangguan ke tanah tipikal 1 ini dimulai dari beban motor G-GB7001M menuju generator GTG SOLAR, melalui saluran Cable393 dan Cable1. Tipikal ini melalui trafo 63-TR-2 dengan kapasitas 6 MVA. Tipikal ini terdiri dari dua level tegangan, yaitu 13.8 kV dan 2.4 kV. Gambar *single line diagram* gangguan fasa ke tanah dapat dilihat pada Gambar 4.10



Gambar 4.10 *Single Line Diagram* Tipikal 1 Gangguan Fasa Ke Tanah

Data eksisting koordinasi proteksi gangguan fasa ke tanah tipikal 1 ini diplot menggunakan *software* ETAP. Pada data eksisting yang diplot adalah reley1 dan reley2. Gambar 4.11 merupakan TCC eksisting dari koordinasi proteksi gangguan fasa ke tanah tipikal 1.



Gambar 4.11 Hasil *Plot Eksisting* Rele Gangguan Fasa ke Tanah Tipikal 1

Dari hasil *plot* kurva eksisting gangguan fasa ke tanah tipikal 1 pada Gambar 4.11 dapat kita lihat bahwa koordinasi kurva proteksi ini tidak tepat, karena saat terjadi gangguan fasa ke tanah waktu yang diperlukan relay1 sebesar 0,3 s. Hal ini tidak diperkenankan karena waktu relay1 untuk memutus gangguan harusnya bisa lebih cepat agar

gangguang bisa cepat diatasi. Untuk melakukan *resetting* pada tipikal 1 ini diperlukan perhitungan secara manual terlebih dahulu.

❖ **Analisa Perhitungan**

Analisa perhitungan harus memperhatikan manufaktur rele yang dipakai dan *grading time*. Perhitungan ulang *setting* rele tersebut adalah sebagai berikut :

Tabel 4.31 Data Setting Rele 1 Gangguan ke Tanah

Reley1	
<i>Manufacture</i>	Schneider Electric – Sepam Series 10
<i>Model</i>	MC Set LF ₁
CT Ratio	100 : 5

Instantaneous Pickup

$$10\% \times I_{sc} L-G \leq I_{set} \leq 50\% \times I_{sc} L-G$$

$$10\% \times 100 \leq I_{set} \leq 50\% \times 100$$

$$10 \leq I_{set} \leq 50$$

$$\frac{10}{100} In \leq Tap \leq \frac{50}{100} In$$

$$0,1 In \leq Tap \leq 0,5 In$$

$$\begin{aligned} \text{Dipilih Tap } 0,3 In &= (0,3 \times 100) \\ &= 30 A \end{aligned}$$

Time delay

Time delay dipilih 0,1 detik

Tabel 4.32 Data Setting Rele 2 Gangguan ke Tanah

Reley2	
<i>Manufacture</i>	Schneider Electric – Sepam Series 10
<i>Model</i>	MC Set LF ₁
Ratio	1600 : 1

Instantaneous Pickup

$$10\% \times I_{sc} L-G \leq I_{set} \leq 50\% \times I_{sc} L-G$$

$$10\% \times 100 \leq I_{set} \leq 50\% \times 100$$

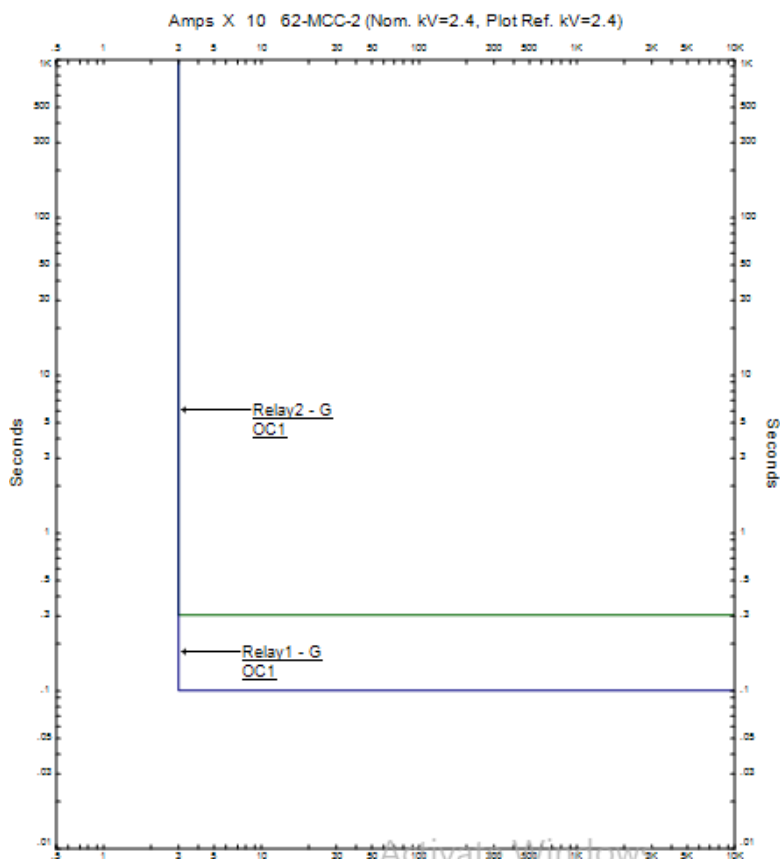
$$10 \leq I_{set} \leq 50$$

$$\frac{10}{1600} In \leq Tap \leq \frac{50}{1600} In$$

$0,006 \text{ In} \leq \text{Tap} \leq 0,03 \text{ In}$
 Dipilih Tap $0,0187 \text{ In} = (0,0187, \times 1600)$
 $= 29,92 \text{ A}$

Time delay

Time delay dipilih 0,3 detik



Gambar 4.12 Hasil Plot Resetting Rele Gangguan Fasa ke Tanah Tipikal 1

Dari hasil *plot* kurva resetting gangguan fasa ke tanah tipikal 1 pada Gambar 4.12 dapat kita lihat bahwa koordinasi kurva proteksi ini sudah benar karena waktu yang diperlukan reley1 untuk memerintahkan CB untuk trip sudah 0,1s.

4.6 Perhitungan Insiden Energy Busur Api dengan Standar IEEE 1584-2002 pada Sistem Eksisting

Pada sub bab ini akan dibahas mengenai nilai dari energy insiden busur api berdasarkan data eksisting dari perusahaan. Nilai yang dicari adalah nilai *arch flash current* dan insiden busur api. Berikut adalah data yang diperlukan untuk perhitungan :

Tabel 4.33 Data Bus Untuk Perhitungan Energi Busur Api Eksisting

ID bus	Tegangan (kV)	I _{bf} (A)	FCT (detik)	Working Distance (mm)	Gap (mm)	X factor
00-SG-01	13,8	17,71	8,212	914	153	0,973
GI KUJANG	13,8	17,75	3,41	914	153	0,973
63-LBS-1A	13,8	16,12	0,36	914	153	0,973
BUSBAR - I	13,8	16,5	0,8	914	153	0,973
BUSBAR -II	13,8	17,49	0,6	914	153	0,973
62-MCC-2	2,4	24,4	0,16	914	102	0,973
MCC 8	2,4	31,31	0,383	457	102	0,973

Perhitungan untuk masing-masing bus dapat dilihat sebagai berikut :

Perhitungan energi busur api di bus dengan level tegangan 1 - 15 kV (bus 6,3 kV)

Rumus yang digunakan :

$$\lg I_a = 0,00404 + (0,983 \times \lg I_{bf})$$

$$I_a = 10^{\lg I_a}$$

$$\lg E_n = K_1 + K_2 + (1,081 \times \lg I_a) + 0,0011 G$$

$$En = 10^{\lg En}$$

$$E = 4,184 \times C_f \times En \times \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right)$$

❖ Bus 00-SG-01

$$\begin{aligned} Lg Ia &= 0,00404 + (0,983 \times \lg 17,71) \\ &= 1,23 \end{aligned}$$

$$Ia = 10^{1,23} = 16,98 \text{ kA}$$

$$\begin{aligned} Lg En &= -0,555 - 0,113 + (1,081 \times 1,23) + (0,0011 \times 153) \\ &= 0,82 \end{aligned}$$

$$En = 10^{0,82} = 6,6 \text{ J/cm}^2$$

$$\begin{aligned} E &= 4,184 \times 1 \times 6,6 \times \left(\frac{8,21}{0,2} \right) \left(\frac{610^{0,973}}{914^{0,973}} \right) \\ &= 764,84 \text{ J/cm}^2 = 182,8 \text{ cal/cm}^2 \end{aligned}$$

❖ Bus GI KUJANG

$$\begin{aligned} Lg Ia &= 0,00404 + (0,983 \times \lg 17,71) \\ &= 1,23 \end{aligned}$$

$$Ia = 10^{1,23} = 16,98 \text{ kA}$$

$$\begin{aligned} Lg En &= -0,555 - 0,113 + (1,081 \times 1,23) + (0,0011 \times 153) \\ &= 0,82 \end{aligned}$$

$$En = 10^{0,82} = 6,6 \text{ J/cm}^2$$

$$\begin{aligned} E &= 4,184 \times 1 \times 6,6 \times \left(\frac{3,41}{0,2} \right) \left(\frac{610^{0,973}}{914^{0,973}} \right) \\ &= 317,67 \text{ J/cm}^2 = 75,92 \text{ cal/cm}^2 \end{aligned}$$

❖ Bus 63-LBS-1A

$$\begin{aligned} Lg Ia &= 0,00404 + (0,983 \times \lg 16,12) \\ &= 1,19 \end{aligned}$$

$$Ia = 10^{1,19} = 15,49 \text{ kA}$$

$$\begin{aligned} Lg En &= -0,555 - 0,113 + (1,081 \times 1,19) + (0,0011 \times 153) \\ &= 0,78 \end{aligned}$$

$$En = 10^{0,78} = 6,02 \text{ J/cm}^2$$

$$\begin{aligned} E &= 4,184 \times 1 \times 6,02 \times \left(\frac{0,36}{0,2} \right) \left(\frac{610^{0,973}}{914^{0,973}} \right) \\ &= 30,53 \text{ J/cm}^2 = 7,29 \text{ cal/cm}^2 \end{aligned}$$

❖ Bus BUSBAR-I

$$\begin{aligned} Lg Ia &= 0,00404 + (0,983 \times \lg 16,5) \\ &= 1,2 \end{aligned}$$

$$Ia = 10^{1,2} = 15,84 \text{ kA}$$

$$\begin{aligned} Lg En &= -0,555 - 0,113 + (1,081 \times 1,2) + (0,0011 \times 153) \\ &= 0,79 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_n &= 10^{0,79} = 6,16 \text{ J/cm}^2 \\
 E &= 4,184 \times 1 \times 6,16 \times \left(\frac{0,8}{0,2} \right) \left(\frac{610^{0,973}}{914^{0,973}} \right) \\
 &= 69,42 \text{ J/cm}^2 = 16,59 \text{ cal/cm}^2
 \end{aligned}$$

❖ Bus BUSBAR-II

$$\begin{aligned}
 Lg \text{ Ia} &= 0,00404 + (0,983 \times \lg 17,49) \\
 &= 1,22 \\
 \text{Ia} &= 10^{1,22} = 16,6 \text{ kA} \\
 Lg \text{ En} &= -0,555 - 0,113 + (1,081 \times 1,22) + (0,0011 \times 153) \\
 &= 0,81 \\
 E_n &= 10^{0,81} = 6,45 \text{ J/cm}^2 \\
 E &= 4,184 \times 1 \times 6,45 \times \left(\frac{0,6}{0,2} \right) \left(\frac{610^{0,973}}{914^{0,973}} \right) \\
 &= 54,62 \text{ J/cm}^2 = 13,05 \text{ cal/cm}^2
 \end{aligned}$$

❖ Bus 62-MCC-2

$$\begin{aligned}
 Lg \text{ Ia} &= 0,00404 + (0,983 \times \lg 24,4) \\
 &= 1,36 \\
 \text{Ia} &= 10^{1,36} = 22,9 \text{ kA} \\
 Lg \text{ En} &= -0,555 - 0,113 + (1,081 \times 1,36) + (0,0011 \times 102) \\
 &= 0,91 \\
 E_n &= 10^{0,91} = 8,12 \text{ J/cm}^2 \\
 E &= 4,184 \times 1 \times 8,12 \times \left(\frac{0,16}{0,2} \right) \left(\frac{610^{0,973}}{914^{0,973}} \right) \\
 &= 18,33 \text{ J/cm}^2 = 4,38 \text{ cal/cm}^2
 \end{aligned}$$

❖ Bus MCC 8

$$\begin{aligned}
 Lg \text{ Ia} &= 0,00404 + (0,983 \times \lg 31,31) \\
 &= 1,47 \\
 \text{Ia} &= 10^{1,47} = 29,5 \text{ kA} \\
 Lg \text{ En} &= -0,555 - 0,113 + (1,081 \times 1,47) + (0,0011 \times 102) \\
 &= 1,03 \\
 E_n &= 10^{1,03} = 10,71 \text{ J/cm}^2 \\
 E &= 4,184 \times 1 \times 10,71 \times \left(\frac{0,383}{0,2} \right) \left(\frac{610^{0,973}}{457^{0,973}} \right) \\
 &= 113,65 \text{ J/cm}^2 = 27,16 \text{ cal/cm}^2
 \end{aligned}$$

4.7 Hasil Simulasi Insiden *Energy* Busur Api Dengan Standar IEEE 1584-2002 Pada Sistem *Resetting*

Hasil simulasi perhitungan busur api menggunakan perangkat lunak ETAP. Simulasi dilakukan pada bus utama sistem kelistrikan PT. Pupuk Kujang. Berikut ini akan ditampilkan besarnya *energy arc flash* pada bus-bus dengan koordinasi *resetting*. Pada Tabel 4.34 akan ditampilkan data *resetting* berupa besarnya arus *bolted fault*, arus aching, FCT (*Fault Clearing Time*), insiden *energy*, dan kategori bahaya.

Tabel 4.34 Data Hasil Simulasi Perhitungan Energi Busur Api Kondisi Resetting

ID bus	Tegangan (kV)	Ibf (kA)	FCT (detik)	Arus Arch (kA)	Insiden Energi (cal/ cm ²)	Energy level
00-SG-01	13,8	17,71	4,136	17,026	94,56	Level >4
GI KUJANG	13,8	17,75	0,76	17,064	17,42	Level 3
63-LBS-1A	13,8	16,12	0,36	15,521	7,45	Level 2
BUSB AR- I	13,8	16,5	0,791	15,885	16,77	Level 3
BUSB AR-II	13,8	17,49	0,6	16,818	13,54	Level 3
62-MCC-2	2,4	24,4	0,16	23,326	5,85	Level 2
MCC 8	2,4	31,31	0,2	29,8	14,45	Level 3

4.8 Perhitungan Insiden *Energy* Busur Api Dengan Standar IEEE 1584-2002 Pada Sistem *Resetting*

Setelah dilakukan perhitungan arc flash current dan insiden energi pada sub – bab sebelumnya dengan menggunakan data eksisting. Pada sub bab ini akan dijelaskan mengenai perhitungan *arc flash current* dan

insiden energi menggunakan data baru yang ada pada Tabel 4.35. *resetting* yang dilakukan akan mempengaruhi nilai dari FCT.

Tabel 4.35 Data Bus Untuk Perhitungan Energi Busur Api Kondisi *Resetting*

ID bus	Tegangan (kV)	I _{bf} (A)	FCT (detik)	Working Distance (mm)	Gap (mm)	X factor
00-SG-01	13,8	17,71	4,136	914	153	0,973
GI KIJANG	13,8	17,75	0,76	914	153	0,973
63-LBS-1A	13,8	16,12	0,36	914	153	0,973
BUSBAR - I	13,8	16,5	0,791	914	153	0,973
BUSBAR -II	13,8	17,49	0,6	914	153	0,973
62-MCC-2	2,4	24,4	0,16	914	102	0,973
MCC 8	2,4	31,31	0,2	457	102	0,973

Perhitungan energi busur api di bus dengan level tegangan 1 - 15 kV (bus 6,3 kV)

Rumus yang digunakan :

$$\text{Lg } I_a = 0,00404 + (0,983 \times \lg I_{bf})$$

$$I_a = 10^{\lg I_a}$$

$$\text{Lg } E_n = K_1 + K_2 + (1,081 \times \lg I_a) + 0,0011 G$$

$$E_n = 10^{\lg E_n}$$

$$E = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right)$$

❖ Bus 00-SG-01

$$\begin{aligned} \text{Lg } I_a &= 0,00404 + (0,983 \times \lg 17,71) \\ &= 1,23 \end{aligned}$$

$$I_a = 10^{1,23} = 16,98 \text{ kA}$$

$$\begin{aligned} \text{Lg } E_n &= -0,555 - 0,113 + (1,081 \times 1,23) + (0,0011 \times 153) \\ &= 0,82 \end{aligned}$$

$$E_n = 10^{0,82} = 6,6 \text{ J/cm}^2$$

$$\begin{aligned}
E &= 4,184 \times 1 \times 6,6 \times \left(\frac{4,136}{0,2} \right) \left(\frac{610^{0,973}}{914^{0,973}} \right) \\
&= 385,31 \text{ J/cm}^2 = 92,09 \text{ cal/ cm}^2
\end{aligned}$$

❖ Bus GI KUJANG

$$\begin{aligned}
\text{Lg Ia} &= 0,00404 + (0,983 \times \lg 17,75) \\
&= 1,23 \\
\text{Ia} &= 10^{1,23} = 16,98 \text{ kA} \\
\text{Lg En} &= -0,555 - 0,113 + (1,081 \times 1,23) + (0,0011 \times 153) \\
&= 0,82 \\
\text{En} &= 10^{0,82} = 6,6 \text{ J/cm}^2 \\
E &= 4,184 \times 1 \times 6,6 \times \left(\frac{0,76}{0,2} \right) \left(\frac{610^{0,973}}{914^{0,973}} \right) \\
&= 70,8 \text{ J/cm}^2 = 16,92 \text{ cal/ cm}^2
\end{aligned}$$

❖ Bus 63-LBS-1A

$$\begin{aligned}
\text{Lg Ia} &= 0,00404 + (0,983 \times \lg 16,12) \\
&= 1,19 \\
\text{Ia} &= 10^{1,19} = 15,49 \text{ kA} \\
\text{Lg En} &= -0,555 - 0,113 + (1,081 \times 1,19) + (0,0011 \times 153) \\
&= 0,78 \\
\text{En} &= 10^{0,78} = 6,02 \text{ J/cm}^2 \\
E &= 4,184 \times 1 \times 6,02 \times \left(\frac{0,36}{0,2} \right) \left(\frac{610^{0,973}}{914^{0,973}} \right) \\
&= 30,53 \text{ J/cm}^2 = 7,29 \text{ cal/ cm}^2
\end{aligned}$$

❖ Bus BUSBAR-I

$$\begin{aligned}
\text{Lg Ia} &= 0,00404 + (0,983 \times \lg 16,5) \\
&= 1,2 \\
\text{Ia} &= 10^{1,2} = 15,84 \text{ kA} \\
\text{Lg En} &= -0,555 - 0,113 + (1,081 \times 1,2) + (0,0011 \times 153) \\
&= 0,79 \\
\text{En} &= 10^{0,79} = 6,16 \text{ J/cm}^2 \\
E &= 4,184 \times 1 \times 6,16 \times \left(\frac{0,791}{0,2} \right) \left(\frac{610^{0,973}}{914^{0,973}} \right) \\
&= 68,78 \text{ J/cm}^2 = 16,44 \text{ cal/ cm}^2
\end{aligned}$$

❖ Bus BUSBAR-II

$$\begin{aligned}
\text{Lg Ia} &= 0,00404 + (0,983 \times \lg 17,49) \\
&= 1,22 \\
\text{Ia} &= 10^{1,22} = 16,6 \text{ kA} \\
\text{Lg En} &= -0,555 - 0,113 + (1,081 \times 1,22) + (0,0011 \times 153) \\
&= 0,81
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_n &= 10^{0,81} = 6,45 \text{ J/cm}^2 \\
 E &= 4,184 \times 1 \times 6,45 \times \left(\frac{0,6}{0,2} \right) \left(\frac{610^{0,973}}{914^{0,973}} \right) \\
 &= 54,62 \text{ J/cm}^2 = 13,05 \text{ cal/cm}^2
 \end{aligned}$$

❖ Bus 62-MCC-2

$$\begin{aligned}
 Lg \text{ Ia} &= 0,00404 + (0,983 \times \lg 24,4) \\
 &= 1,37 \\
 \text{Ia} &= 10^{1,37} = 23,44 \text{ kA} \\
 Lg \text{ En} &= -0,555 - 0,113 + (1,081 \times 1,37) + (0,0011 \times 102) \\
 &= 0,92 \\
 E_n &= 10^{0,92} = 8,32 \text{ J/cm}^2 \\
 E &= 4,184 \times 1 \times 8,32 \times \left(\frac{0,16}{0,2} \right) \left(\frac{610^{0,973}}{914^{0,973}} \right) \\
 &= 18,8 \text{ J/cm}^2 = 4,5 \text{ cal/cm}^2
 \end{aligned}$$

❖ Bus MCC 8

$$\begin{aligned}
 Lg \text{ Ia} &= 0,00404 + (0,983 \times \lg 31,31) \\
 &= 1,47 \\
 \text{Ia} &= 10^{1,47} = 29,5 \text{ kA} \\
 Lg \text{ En} &= -0,555 - 0,113 + (1,081 \times 1,47) + (0,0011 \times 102) \\
 &= 1,03 \\
 E_n &= 10^{1,03} = 10,71 \text{ J/cm}^2 \\
 E &= 4,184 \times 1 \times 10,71 \times \left(\frac{0,2}{0,2} \right) \left(\frac{610^{0,973}}{457^{0,973}} \right) \\
 &= 59,35 \text{ J/cm}^2 = 14,19 \text{ cal/cm}^2
 \end{aligned}$$

4.9 Perbandingan Hasil Simulasi Insiden Energy Busur Api Resetting Dengan Perhitungan Insiden Energy Busur Api Resetting Dengan Standar IEEE 1584-2002

Pada sub bab ini akan ditampilkan perbandingan hasil dari perhitungan manual insiden *energy* busur api menggunakan standar IEEE 1584-2002 dengan hasil dari simulasi menggunakan perangkat lunak ETAP. Pada Tabel 4.36 merupakan hasil dari nilai perhitungan manual dengan hasil simulasi.

Tabel 4.36 Perbandingan Insiden Energi Perhitungan dan Simulasi Kondisi *Resetting*

Bus ID	Resetting	
	Hasil Perhitungan Insiden Energi (cal/cm ²)	Hasil Simulasi Insiden Energi (cal/cm ²)
00-SG-01	92,09	94,56
GI KUJANG	16,92	17,42
63-LBS-1A	7,29	7,45
BUSBAR- I	16,44	16,77
BUSBAR-II	13,05	13,54
62-MCC-2	4,5	5,86
MCC 8	14,19	14,45

Dari data diatas terlihat terdapat sedikit perbedaan antara hasil simulasi dengan hasil perhitungan. Ini dikarenakan pada perhitungan manual terdapat beberapa pembulatan di setiap hasilnya, yang menyebabkan hasil perhitungan menjadi sedikit berbeda.

4.10 Hasil Simulasi Insiden *Energy* Busur Api Dengan Standar IEEE 1584-2002 Pada Sistem *Resetting* Memperhitungkan *Arc Flash*

Hasil simulasi perhitungan busur api menggunakan perangkat lunak ETAP. Simulasi dilakukan pada bus utama sistem kelistrikan PT. Pupuk Kujang. Berikut ini akan ditampilkan besarnya *energy arc flash* pada bus-bus dengan koordinasi *resetting* dengan memperhitungkan *arc flash*. Pada Tabel 4.37 akan ditampilkan data *resetting* dengan memperhitungkan *arc flash* berupa besarnya arus *bolted fault*, arus aching, FCT (*Fault Clearing Time*), insiden *energy*, dan kategori bahaya.

Tabel 4.37 Data Hasil Simulasi Perhitungan Energi Busur Api Kondisi *Resetting* Memperhitungkan *Arc Flash*

ID bus	Tegangan (kV)	Ibf (kA)	FCT (detik)	Arus Arch (kA)	Insiden Energi (cal/ cm ²)	Energy level
00-SG-01	13,8	17,71	0,76	17,026	17,38	Level 3
GI KUJANG	13,8	17,75	0,76	17,064	17,42	Level 3
63-LBS-1A	13,8	16,12	0,36	15,521	7,45	Level 2
BUSB AR- I	13,8	16,5	0,776	15,885	16,47	Level 3
BUSB AR-II	13,8	17,49	0,6	16,818	13,54	Level 3
62-MCC-2	2,4	24,4	0,16	23,326	5,86	Level 2
MCC 8	2,4	31,31	0,2	29,8	14,45	Level 3

4.11 Perhitungan Insiden Energy Busur Api Dengan Standar IEEE 1584-2002 Pada Sistem *Resetting* Memperhitungkan *Arc Flash*

Setelah dilakukan perhitungan arc flash current dan insiden energi pada sub – bab sebelumnya dengan menggunakan data resetting. Pada sub bab ini akan dijelaskan mengenai perhitungan *arc flash current* dan insiden energi menggunakan data baru yang ada pada Tabel 4.38. *resetting* yang dilakukan memperhitungkan *arc flash* akan mempengaruhi nilai dari FCT.

Tabel 4.38 Data Bus Untuk Perhitungan Energi Busur Api Kondisi *Resetting* Memperhitungkan *Arc Flash*

ID bus	Tegangan (kV)	I _{bf} (A)	FCT (detik)	Working Distance (mm)	Gap (mm)	X factor
00-SG-01	13,8	17,71	0,76	914	153	0,973
GI KUJANG	13,8	17,75	0,76	914	153	0,973
63-LBS-1A	13,8	16,12	0,36	914	153	0,973
BUSBAR - I	13,8	16,5	0,776	914	153	0,973
BUSBAR -II	13,8	17,49	0,6	914	153	0,973
62-MCC-2	2,4	24,4	0,16	914	102	0,973
MCC 8	2,4	31,31	0,2	457	102	0,973

Perhitungan energi busur api di bus dengan level tegangan 1 - 15 kV (bus 6,3 kV)

Rumus yang digunakan :

$$Lg I_a = 0,00404 + (0,983 \times \lg I_{bf})$$

$$I_a = 10^{\lg I_a}$$

$$Lg E_n = K_1 + K_2 + (1,081 \times \lg I_a) + 0,0011 G$$

$$E_n = 10^{\lg E_n}$$

$$E = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right)$$

❖ Bus 00-SG-01

$$Lg I_a = 0,00404 + (0,983 \times \lg 17,71)$$

$$= 1,23$$

$$I_a = 10^{1,23} = 16,98 \text{ kA}$$

$$Lg E_n = -0,555 - 0,113 + (1,081 \times 1,23) + (0,0011 \times 153)$$

$$= 0,82$$

$$E_n = 10^{0,82} = 6,6 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 6,6 \times \left(\frac{0,76}{0,2} \right) \left(\frac{610^{0,973}}{914^{0,973}} \right)$$

$$= 70,8 \text{ J/cm}^2 = 16,92 \text{ cal/cm}^2$$

❖ Bus GI KUJANG

$$\begin{aligned}
\text{Lg Ia} &= 0,00404 + (0,983 \times \lg 17,75) \\
&= 1,23 \\
\text{Ia} &= 10^{1,23} = 16,98 \text{ kA} \\
\text{Lg En} &= -0,555 - 0,113 + (1,081 \times 1,23) + (0,0011 \times 153) \\
&= 0,82 \\
\text{En} &= 10^{0,82} = 6,6 \text{ J/cm}^2 \\
\text{E} &= 4,184 \times 1 \times 6,6 \times \left(\frac{0,76}{0,2} \right) \left(\frac{610^{0,973}}{914^{0,973}} \right) \\
&= 70,8 \text{ J/cm}^2 = 16,92 \text{ cal/cm}^2
\end{aligned}$$

❖ Bus 63-LBS-1A

$$\begin{aligned}
\text{Lg Ia} &= 0,00404 + (0,983 \times \lg 16,12) \\
&= 1,19 \\
\text{Ia} &= 10^{1,19} = 15,49 \text{ kA} \\
\text{Lg En} &= -0,555 - 0,113 + (1,081 \times 1,19) + (0,0011 \times 153) \\
&= 0,78 \\
\text{En} &= 10^{0,78} = 6,02 \text{ J/cm}^2 \\
\text{E} &= 4,184 \times 1 \times 6,02 \times \left(\frac{0,36}{0,2} \right) \left(\frac{610^{0,973}}{914^{0,973}} \right) \\
&= 30,53 \text{ J/cm}^2 = 7,29 \text{ cal/cm}^2
\end{aligned}$$

❖ Bus BUSBAR-I

$$\begin{aligned}
\text{Lg Ia} &= 0,00404 + (0,983 \times \lg 16,5) \\
&= 1,2 \\
\text{Ia} &= 10^{1,2} = 15,84 \text{ kA} \\
\text{Lg En} &= -0,555 - 0,113 + (1,081 \times 1,2) + (0,0011 \times 153) \\
&= 0,79 \\
\text{En} &= 10^{0,79} = 6,16 \text{ J/cm}^2 \\
\text{E} &= 4,184 \times 1 \times 6,16 \times \left(\frac{0,776}{0,2} \right) \left(\frac{610^{0,973}}{914^{0,973}} \right) \\
&= 67,48 \text{ J/cm}^2 = 16,13 \text{ cal/cm}^2
\end{aligned}$$

❖ Bus BUSBAR-II

$$\begin{aligned}
\text{Lg Ia} &= 0,00404 + (0,983 \times \lg 17,49) \\
&= 1,22 \\
\text{Ia} &= 10^{1,22} = 16,6 \text{ kA} \\
\text{Lg En} &= -0,555 - 0,113 + (1,081 \times 1,22) + (0,0011 \times 153) \\
&= 0,81 \\
\text{En} &= 10^{0,81} = 6,45 \text{ J/cm}^2 \\
\text{E} &= 4,184 \times 1 \times 6,45 \times \left(\frac{0,6}{0,2} \right) \left(\frac{610^{0,973}}{914^{0,973}} \right) \\
&= 54,62 \text{ J/cm}^2 = 13,05 \text{ cal/cm}^2
\end{aligned}$$

❖ Bus 62-MCC-2

$$\begin{aligned}
 Lg \text{ Ia} &= 0,00404 + (0,983 \times \lg 24,4) \\
 &= 1,37 \\
 \text{Ia} &= 10^{1,37} = 23,44 \text{ kA} \\
 Lg \text{ En} &= -0,555 - 0,113 + (1,081 \times 1,37) + (0,0011 \times 102) \\
 &= 0,92 \\
 \text{En} &= 10^{0,92} = 8,32 \text{ J/cm}^2 \\
 E &= 4,184 \times 1 \times 8,32 \times \left(\frac{0,16}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{914^{0,973}}\right) \\
 &= 18,8 \text{ J/cm}^2 = 4,5 \text{ cal/cm}^2
 \end{aligned}$$

❖ Bus MCC 8

$$\begin{aligned}
 Lg \text{ Ia} &= 0,00404 + (0,983 \times \lg 31,31) \\
 &= 1,47 \\
 \text{Ia} &= 10^{1,47} = 29,5 \text{ kA} \\
 Lg \text{ En} &= -0,555 - 0,113 + (1,081 \times 1,47) + (0,0011 \times 102) \\
 &= 1,03 \\
 \text{En} &= 10^{1,03} = 10,71 \text{ J/cm}^2 \\
 E &= 4,184 \times 1 \times 10,71 \times \left(\frac{0,2}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{457^{0,973}}\right) \\
 &= 59,35 \text{ J/cm}^2 = 14,19 \text{ cal/cm}^2
 \end{aligned}$$

4.12 Perbandingan Hasil Simulasi Insiden Energy Busur Api *Resetting* Memperhitungkan *Arc Flash* dengan Perhitungan Insiden Energy Busur Api *Resetting* Memperhitungkan *Arc Flash* Menurut Standar IEEE 1584-2002

Pada sub bab ini akan ditampilkan perbandingan hasil dari perhitungan manual insiden *energy* busur api menggunakan standar IEEE 1584-2002 dengan hasil dari simulasi menggunakan perangkat lunak ETAP. Pada Tabel 4.39 merupakan hasil dari nilai perhitungan manual dengan hasil simulasi.

Tabel 4.39 Perbandingan Insiden Energi Perhitungan dan Simulasi Kondisi *Resetting* Memperhitungkan *Arc Flash*

Bus ID	Resetting Memperhitungkan <i>Arc Flash</i>	
	Hasil Perhitungan Insiden Energi (cal/ cm ²)	Hasil Simulasi Insiden Energi (cal/ cm ²)
00-SG-01	16,92	17,38
GI KUJANG	16,92	17,42
63-LBS-1A	7,29	7,45
BUSBAR- I	16,13	16,47
BUSBAR-II	13,05	13,54
62-MCC-2	4,5	5,86
MCC 8	14,19	14,45

Dari data diatas terlihat terdapat sedikit perbedaan antara hasil simulasi dengan hasil perhitungan. Ini dikarenakan pada perhitungan manual terdapat beberapa pembulatan di setiap hasilnya, yang menyebabkan hasil perhitungan menjadi sedikit berbeda.

4.13 Perhitungan *Flash Protection Boundary* Kondisi *Resetting* Memperhitungkan *Arc Flash*

Nilai energy busur api yang telah dihitung akan digunakan untuk menentukan jarak aman untuk bekerja dalam lingkungan bertegangan.

Dalam perhitungan ini menggunakan *flash protection boundary* yang berdasarkan pada insiden energy di 5 J/cm². Perhitungan *protection boundary* untuk tegangan ≤ 15 kV

Rumus yang digunakan adalah :

$$D_B = \left[4.184 C_f E_n \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

❖ Bus 00-SG-01

$$\begin{aligned} D_B &= [4,184 \times 1 \times 6,6 \times \left(\frac{0,76}{0,2} \right) \left(\frac{610^{0,973}}{5} \right)]^{\frac{1}{0,973}} \\ &= 13930,35 \text{ mm} \end{aligned}$$

❖ Bus GI KUJANG

$$D_B = [4,184 \times 1 \times 6,6 \times \left(\frac{0,76}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{5}\right)]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 13930,35 \text{ mm}$$

❖ Bus 63-LBS-1A

$$D_B = [4,184 \times 1 \times 6,02 \times \left(\frac{0,36}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{5}\right)]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 5880,17 \text{ mm}$$

❖ Bus BUSBAR-I

$$D_B = [4,184 \times 1 \times 6,16 \times \left(\frac{0,776}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{5}\right)]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 13257,65 \text{ mm}$$

❖ Bus BUSBAR-II

$$D_B = [4,184 \times 1 \times 6,45 \times \left(\frac{0,6}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{5}\right)]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 10670,62 \text{ mm}$$

❖ Bus 62-MCC-2

$$D_B = [4,184 \times 1 \times 8,32 \times \left(\frac{0,16}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{5}\right)]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 3563,37 \text{ mm}$$

❖ Bus MCC 8

$$D_B = [4,184 \times 1 \times 10,71 \times \left(\frac{0,2}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{5}\right)]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$= 5809,91 \text{ mm}$$

Protection boundary merupakan batasan daerah kerja untuk para pekerja di lingkungan bertegangan. Setiap daerah memiliki resiko yang berbeda. Dengan penurunan energi busur api, tingkat resiko bahaya juga berkurang dan jarak dari pekerja keperalatan juga semakin dekat. Dengan mengetahui resiko dari bahaya pekerjaan di daerah bertegangan, pekerja dapat menggunakan peralatan yang sesuai dan pencegahan - pencegahan yang perlu diambil. Pada tabel 4.40 merupakan hasil *setting flash protection boundary* pada kondisi *resetting* memperhitungkan *arc flash*.

Tabel 4.40 Hasil *Flash Protection Boundary Resetting* Memperhitungkan *Arc Flash*

ID BUS	Resetting	
	Hasil Perhitungan <i>Flash Protection boundary</i> (m)	Hasil Simulasi <i>Flash Protection boundary</i> (m)
00-SG-01	13,93	14,3
GI KUJANG	13,93	14,3
63-LBS-1A	5,88	6
BUSBAR- I	13,26	13,5
BUSBAR-II	10,67	11
62-MCC-2	3,56	4,7
MCC 8	5,8	5,9

Dari data diatas terlihat hasil perhitungan *Flash Protection boundary* dengan hasil simulasi *Flash Protection boundary* menggunakan perangkat lunak ETAP mempunyai hasil mendekati sama.

4.14 Perbandingan Besar Energi Busur Api Kondisi Eksisting, *Resetting*, dan *Resetting* Memperhitungkan *Arc Flash*

Pada beberapa sub bab sebelumnya telah ditampilkan hasil perhitungan dan simulasi besarnya insiden energy pada sistem kelistrikan PT. Pupuk Kujang. Pada sub bab ini akan dijelesakan mengenai perbedaan insiden energy pada kondisi eksisting, *resetting*, dan *resetting* memperhitungkan *arc flash*. Perbandingan data tersebut ditampilkan pada tabel 4.41

Tabel 4.41 Data Perbandingan Insiden Energi Sistem *Eksisting*, *Resetting*, dan *Resetting* Memperhitungkan *Arc Flash*

ID Bus	Insiden Energi <i>Eksisting</i> (cal/cm ²)	Level Energi	Insiden Energi <i>Resetting</i> (cal/cm ²)	Level Energi	Insiden Energi <i>Resetting</i> Memperhitungkan <i>Arc Flash</i>	Level Energi
00-SG-01	187,75	Level >4	94,56	Level >4	17,38	Level 3
GI KUIJANG	78,16	Level >4	17,42	Level 3	17,42	Level 3
63-LBS-1A	7,45	Level 2	7,45	Level 2	7,45	Level 2
BUSBAR-I	16,97	Level 3	16,77	Level 3	16,47	Level 3
BUSBAR-II	13,54	Level 3	13,54	Level 3	13,54	Level 3
62-MCC-2	5,86	Level 2	5,86	Level 2	5,86	Level 2
MCC 8	27,65	Level 4	14,45	Level 3	14,45	Level 3




Berdasarkan tabel 4.41, jika dibandingkan dengan kondisi eksisting, *resetting* memperhitungkan *arc flash* pada bus 00-SG-01, GI KUIJANG, BUSBAR-I dan MCC 8 mengalami penurunan energi, hal ini dikarenakan berubahnya nilai FCT (*Fault Clearing Time*) setelah sistem terkoordinasi dengan benar. *Resetting* memperhitungkan *arc flash* yang dilakukan dengan *pickup* minimum arus untuk kurva *overcurrent* maupun *instantaneous*.

4.15 Personal Protective Equipment (PPE) yang Harus Digunakan Pada PT. Pupuk Kujang





Personal protective equipment (PPE) merupakan alat perlindungan diri yang harus digunakan ketika melakukan suatu pekerjaan di daerah yang beresiko terkena busur api. Berdasarkan hasil analisa busur api yang dilakukan untuk kondisi setelah *resetting* memperhitungkan *arc flash* pada bus utama di PT. Pupuk Kujang, maka jenis PPE dapat dilihat pada Tabel 4.42.

Penting untuk menganalisa dan mengetahui besar *energy* busur api yang ada agar mengetahui jenis PPE yang tepat yang harus digunakan supaya dapat menurunkan resiko terkena dampak dari busur api bagi para pekerja.

Tabel 4.42 Kategori PPE Bus Utama Pada PT. Pupuk Kujang

No.	ID Bus	Kategori PPE	PPE
1	00-SG-01	3	Flash suit hood, Pelindung wajah dan kepala, Pakaian tahan api, Pelindung mata, Pelindung telinga, Celana panjang 
2	GI KIJANG	3	Flash suit hood, Pelindung wajah dan kepala, Pakaian tahan api, Pelindung mata, Pelindung telinga, Celana panjang 
3	63-LBS-1A	2	Pelindung Wajah dan Kepala, Pakaian Tahan Api, Pelindung Mata, Pelindung Telinga, Celana Panjang 

Tabel 4.42 Data Kategori PPE Bus Pada PT. Pupuk Kujang (lanjutan)

No.	ID Bus	Kategori PPE	PPE	
4	BUSBAR-I	3	Flash suit hood, Pelindung wajah dan kepala, Pakaian tahan api, Pelindung mata, Pelindung telinga, Celana panjang	 Hazard Risk Category 3
5	BUSBAR-II	3	Flash suit hood, Pelindung wajah dan kepala, Pakaian tahan api, Pelindung mata, Pelindung telinga, Celana panjang	 Hazard Risk Category 3
6	62-MCC-2	2	Pelindung Wajah dan Kepala, Pakaian Tahan Api, Pelindung Mata, Pelindung Telinga, Celana Panjang	 Hazard Risk Category 2
7	MCC 8	3	Flash suit hood, Pelindung wajah dan kepala, Pakaian tahan api, Pelindung mata, Pelindung telinga, Celana panjang	 Hazard Risk Category 3

————— *Halaman ini sengaja dikosongkan* —————

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil studi koordinasi proteksi dan busur api pada sistem kelistrikan di PT. Pupuk Kujang, Cikampek, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Pada sistem koordinasi eksisting di PT. Pupuk Kujang terdapat koordinasi yang kurang tepat sehingga perlu disempurnakan. Terlihat dari hasil *plot* kurva arus waktu rele pengaman untuk kondisi eksisting menunjukkan bahwa rele belum terkoordinasi dengan baik. Resetting dilakukan dengan menyesuaikan *greading time* rele pengaman berdasarkan koordinasi proteksi menggunakan standar IEEE 242 dan beberapa diktat dari dosen Teknik Elektro.
2. Hasil setting koordinasi proteksi memperhitungkan *arc flash* didapatkan penurunan insiden energi pada bus 00-SG-01, GI Kujang, BUSBAR-I dan MCC 8. Dengan mengambil contoh bus 00-SG-01, insiden energy saat eksisting sebesar 187,75 cal/cm² setelah diresetting menjadi 17,38 cal/cm². Resetting yang dilakukan akan mempengaruhi nilai dari FCT (*Fault Clearing Time*). Turunnya FCT karena koordinasi yang handal pada rele setelah dilakukan resetting, terutama untuk pemilihan arus pickup pada rele.
3. Alat pelindung yang digunakan pada bus 00-SG-01, GI KIJANG, BUSBAR- I, BUSBAR-II, MCC 8 adalah alat pelindung kategori 3 seperti *flash suit hood*, pelindung wajah dan kepala, pakaian tahan api, pelindung mata, pelindung telinga, celana panjang dan untuk bus 63-LBS-1A, 62-MCC-2 adalah pelindung kategori 2 seperti pelindung wajah dan kepala, pakaian tahan api, pelindung mata, pelindung telinga, celana panjang.

5.2Saran

Dengan mempertimbangkan hasil studi yang telah dilakukan pada tugas akhir ini, ada beberapa saran yang dapat menjadi masukan untuk kedepannya :

1. Dari setting rele pengaman yang didapat dan hasil dari plot kurva arus waktu resetting dapat dijadikan pertimbangan dan referensi dalam melakukan setting rele pengamanan pada PT. Pupuk Kujang.
2. Untuk mengurangi insiden energi lanjutan direkomendasikan untuk menggunakan rele status atau *defferential* bus.
3. Setelah dilakukan perhitungan besarnya energy arc flash di bus utama PT. Pupuk Kujang, pekerja tau berapa energy arc flash, jarak aman kerja, dan penggunaan PPE sesuai standar hasil perhitungan.

DAFTAR PUSTAKA

1. IEEE Std 242-2001™, “*IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems*”, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, Ch. 15, 2001
2. NFPA 70E-2004, *Electrical Safety Requirements for Employee Workplaces*.
3. Wahyudi, “*Diktat Kuliah Pengaman Sistem Tenaga Listrik*”, Teknik Elektro ITS, Surabaya, Bab 2, 2004
4. Cahier Technique No. 158, “*Calculation of Short-circuit Currents*”, Schneider Electric, 2005
5. Anderson, P.M, “*Power System Protection*”, John Wiley & Sons, Inc., Canada, Ch. 3, 1998
6. Gers, Juan M., dan Holmes, Edward J., “*Protection of Electrical Distribution Network 2nd Edition*”, The Institution of Electrical Engineers, London, Ch. 5, 2004
7. Gurevich, Vladimir, “*Electric Relays, Principle and Application*”, CRC Press, USA, Ch. 10, 2006
8. “*Impact of Arc Flash Hazards on Medium Voltage Switchgear*” K. R. Shah, Life Senior Member, A. Cinsavich, P. De Silva, Member Shah & Associates, Inc. 416 North Frederick Avenue, Gaithersburg, MD 208770197-2618/07/\$25.00 © 2007 IEEE.
9. Tinsley H.W., Hodeker., Graham A.M., “*Arc Flash Hazard Calculations – Myths, Facts, and Solutions*,” IEEE Industry Applications Magazine, pp. 58, January/February 2007.
10. IEEE Std. 1584-2002., “*IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculation*”, by the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2002.

————— *Halaman ini sengaja dikosongkan* —————

BIOGRAFI PENULIS



Teddy Anugrah Ramanel, dilahirkan di kota Padang pada tanggal 9 April 1995. Merupakan anak pertama dari pasangan Ramadansyah dan Nelti. Penulis telah menempuh pendidikan selama 13 tahun (TK-SD-SMP-SMA) di kota Padang. Penulis memulai jenjang pendidikan di TK Harapan Ibu pada tahun 1999-2001, SD Negeri 22 Andalas, Padang pada tahun 2001-2007, SMP Negeri 1 Padang pada tahun 2007-2010 dan SMA Negeri 1 Padang pada tahun 2010-2013 dan sejak tahun 2013 menempuh pendidikan sebagai mahasiswa bidang studi

Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya. Selama kuliah penulis aktif di UKM sepakbola ITS, futsal ITS, Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro ITS tahun 2014, sepakbola dan futsal Teknik Elektro serta aktif dalam mengikuti pelatihan dan seminar yang diselenggarakan oleh Departemen Teknik Elektro. Penulis dapat dihubungi melalui email teddyramanel@gmail.com